

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Tomislav Geršić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Student:

Tomislav Geršić

Zagreb, 2013.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad, pod nazivom **Uloga premaza u zaštiti od buke**, izradio samostalno, služeći se navedenom literaturom i znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, uz stručnu pomoć prof. dr. sc. Biserke Runje.

Tomislav Geršić

ZAHVALA

Prije svega, zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Biserki Runje na susretljivosti, stručnim promišljanjima i savjetima bez kojih bi ovaj rad jednostavno bio nedovršen.

Zahvaljujem se i kolegici Ivani Ropuš na ustupljenim podacima i dobrohotnim savjetima.

Posebnu zahvalu dugujem svojim roditeljima; znam da je trajalo. Hvala Vam na financijskoj podršci, na silnim odricanjima i strpljenju, a ponajviše na tome što ste me puštali na miru, kada mi je mir trebao. Isplatit će se sve to jednoga dana, vidjet ćete.

Zahvaljujem se i svojim dragim prijateljima- vi ćete se već prepoznati. Zbog vas će sjećanja na studentske dane nositi miris kave. I ne bih to mijenjao ni za što.

Na posljetku, hvala Saši. Bila si tu, kraj mene, i više nego što znaš. I kada nije išlo, ti i pomisao na nas, to bi me povuklo. Još malo, još samo malo.

Hvala Vam svima, od srca.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **TOMISLAV GERŠIĆ**

Mat. br.: 0035167027

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ULOGA PREMAZA U ZAŠTITI OD BUKE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **THE ROLE OF COATINGS IN NOISE PROTECTION**

Opis zadatka:

1. Potrebno je u kratko definirati pojam buke, osnovne fizikalne parametre te opće pojmove o buci. Osvrnuti se na djelovanje buke na radnika u industriji, preporučljive razine buke i dopuštene intenzitete buke. Posebno razraditi mehanizme zaštite od buke u industriji.
2. Definirati ulogu premaza u zaštiti od buke s posebnim osvrtom na tehnologiju nanočestica. Opisati tehnologiju nanošenja premaza, te detaljno razraditi metode ispitivanja debljine premaza u postupku zaštite od buke u industrijskim postrojenjima. Navesti metode i mjerne sustave za mjerenje buke u industriji.

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Biserka Runje

Rok predaje rada:

1. rok: 15. veljače 2013.

2. rok: 11. srpnja 2013.

3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.

2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.

3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	V
POPIS TABLICA.....	VIII
POPIS OZNAKA	IX
SAŽETAK	XI
SUMMARY.....	XII
KLJUČNE RIJEČI	XIII
KEYWORDS	XIII
1. UVOD	1
2. ZVUK- FIZIKALNE OSNOVE.....	2
2. 1. VAL	2
2. 2. ZVUK	4
2. 2. 1. FREKVENCIJA ZVUKA I VALNA DULJINA	5
2. 2. 2. BRZINA ZVUKA.....	6
2. 2. 3. INTENZITET ZVUKA	6
2. 2. 4. BOJA ZVUKA	8
2. 2. 5. OSTALE BITNIJE AKUSTIČKE POJAVE.....	9
3. BUKA	11
3. 1. IZVORI BUKE.....	11
3. 2. FIZIKALNO- TEHNIČKI ASPEKTI BUKE.....	12

3. 3. BUKA SA MEDICINSKO- ZDRAVSTVENOG STAJALIŠTA	14
3. 4. SOCIJALNO- PRAVNI POGLED NA BUKU	21
4. BUKA U INDUSTRIJI	22
4. 1. UTJECAJ INDUSTRIJSKE BUKE NA RAD	22
4. 2. ZAKON U SLUŽBI ZAŠTITE RADNIKA OD INDUSTRIJSKE BUKE	26
4. 3. MEHANIZMI ZAŠTITE OD BUKE U INDUSTRIJI	30
4. 3. 1. POLAZIŠNE POSTAVKE	31
4. 3. 2. PRINCIPI ZAŠTITE OD BUKE U INDUSTRIJI.....	31
4. 3. 2. 1. IZOLACIJA.....	32
4. 3. 2. 2. APSORPCIJA	34
4. 3. 2. 3. IZOLACIJA VIBRACIJA.....	36
4. 3. 2. 4. PRIGUŠENJE VIBRACIJA	37
4. 3. 3. ODABIR ODGOVARAJUĆEG MATERIJALA	37
4. 4. MJERENJE BUKE U INDUSTRIJI.....	39
4. 4. 1. STANDARDI ZA MJERENJE BUKE	40
4. 4. 2. UTJECAJI NA MJERENJE BUKE	41
4. 4. 3. INSTRUMENTI ZA MJERENJE BUKE.....	42
5. PREMAZI	46
5. 1. KOMPONENTE PREMAZA	47
5. 2. SUSTAV PREMAZA.....	49
5. 3. KLASIFIKACIJA PREMAZA	51

5. 4. POSTUPAK NANOŠENJA PREMAZA NA POVRŠINU MATERIJALA.....	52
5. 4. 1. PRIPREMA POVRŠINE.....	52
5. 4. 2. PRIPREMA BOJE.....	54
5. 4. 3. NANOŠENJE PREMAZA	55
5. 4. 3. 1. BOJENJE ČETKAMA	55
5. 4. 3. 2. NANOŠENJE BOJE LOPATICAMA.....	56
5. 4. 3. 3. BOJENJE VALJCIMA	57
5. 4. 3. 4. PRSKANJE BOJE	57
5. 4. 3. 5. BOJENJE URANJANJEM I PRELIJEVANJEM.....	60
5. 4. 3. 6. NANOŠENJE BOJE ELEKTROFOREZOM	60
5. 4. 4. SUŠENJE PREMAZA	61
5. 5. ISPITIVANJE DEBLJINE PREMAZA	62
5. 5. 1. MJERENJE DEBLJINE MOKROG FILMA PREMAZA.....	66
5. 5. 2. MJERENJE DEBLJINE SUHOG FILMA PREMAZA	67
5. 5. 2. 1. DESTRUKTIVNE METODE.....	67
5. 5. 2. 2. NEDESTRUKTIVNE METODE	68
6. PREMAZI KAO OBLIK ZAŠTITE OD BUKE.....	73
6. 1. OSNOVNO NAČELO PRIGUŠENJA I SVOJSTVO VISKOELASTIČNOSTI.....	74
6. 2. ULOGA NANOČESTICA U PREMAZIMA.....	80
7. EKSPERIMENTALNI DIO	84
8. ZAKLJUČAK	90

9. LITERATURA.....	91
--------------------	----

POPIS SLIKA

Slika 1. Transverzalni val [1]	2
Slika 2. Longitudinalni val [1]	3
Slika 3. Usporedba transverznog i longitudinalnog vala [1]	3
Slika 4. Valna duljina [4]	5
Slika 5. Točkasti izvor zvuka i sferno širenje zvuka kroz prostor [1]	7
Slika 6. Refleksija zvuka [5]	9
Slika 7. Refrakcija vala [5]	10
Slika 8. Dopplerov efekt [6]	10
Slika 9. Ovisnost promjene TTS- a o vremenu izloženosti buci i razini buke [12]	18
Slika 10. Posljedice izloženosti zvuku određene glasnoće u konkretnome vremenskom intervalu [12]	19
Slika 11. Primjer audiograma zdrave i nagluhe osobe [12]	20
Slika 12. Razine industrijske buke i postotak ispitanika koji su se osjećali izrazito razdraženo [14]	23
Slika 13. Odnos razina industrijske buke i vjerojatnosti da će doći do nezgode na radu [14] ..	24
Slika 14. Reakcije ispitanika na industrijsku buku [14]	24
Slika 15. Međunarodna klasifikacija standarda u području buke [19]	40
Slika 16. Campbellov trodimenzionalni dijagram [19]	41
Slika 17. Tipična shema mjerača buke [19]	43
Slika 18. Prikaz principa mjerenja razine buke okoline [19]	44

Slika 19. Tipični dozimetar [19]	44
Slika 20. Konfiguracija mjernog sustava NMT 3637B [19].....	45
Slika 21. Komponente mjernog sustava NMT 3637B [19].....	45
Slika 22. Komponente premaza [24]	47
Slika 23. Višeslojni nepropustan sustav premaza [24]	50
Slika 24. Podjela premaza prema načinu sušenja [24]	52
Slika 25. <i>Stripe coating</i> zavora u spremniku tereta [24].....	56
Slika 26. Primjena zračnog prskanja [24]	58
Slika 27. Bezračni postupak nanošenja boje na nadvodni dio broda [24].....	59
Slika 28. Mjerenje debljine mokrog filma premaza „češljem“ [24]	67
Slika 29. Roll- back magnetski uređaj za mjerenje debljine prevlake [27]	69
Slika 30. Princip mjerenja debljine prevlake magnetskom metodom [27]	69
Slika 31. Osnovni princip metode vrtložnih struja [27]	70
Slika 32. Uređaj za mjerenje debljine premaza metodom vrtložnih struja [28]	71
Slika 33. Razlika između elastične i viskozne deformacije [35]	75
Slika 34. Prigušenje ograničavajućim slojem (CLD) [31]	76
Slika 35. Podesno viskoelastično prigušenje (TVD) [31]	76
Slika 36. Rezultat rada TVD- a [31]	77
Slika 37. Prigušenje slobodnim slojem (FLD) [31]	77
Slika 38. Skica sustava viskoelastičnog premaza i bazne strukture pod vibracijskim opterećenjem [36].....	78

Slika 39. Automobilska struktura iskorištena za testiranje [31]	79
Slika 40. Dobiveni rezultati ispitivanja uspoređeni sa referentnim vrijednostima [31]	79
Slika 41. Izvor buke od 500 mV	85
Slika 42. Vrata dijele zvučnik od gluhe komore i mjerača razine buke	85
Slika 43. Shematski prikaz postavljenog sustava	86
Slika 44. Vrata i otvor za umetanje premazane ploče	87
Slika 45. Rezultati ispitivanja prikazani 3D dijagramom	88
Slika 46. Rezultati ispitivanja prikazani 2D dijagramom	89
Slika 47. Rezultati ispitivanja prikazani <i>bar chartom</i>	89

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svakodnevni zvukovi i njihovi intenziteti [1]	8
Tablica 2. Reakcije zdravih pojedinaca na određenu glasnoću zvuka [12]	17
Tablica 3. Dopuštene razine buke s obzirom na vrstu djelatnosti [17]	30
Tablica 4. Transmisijski gubitak zvuka kroz često korištene materijale [18]	32
Tablica 5. STC za pojedine česte građevne materijale [18]	33
Tablica 6. Koeficijenti apsorpcije zvuka α za česte akustičke materijale [18]	34
Tablica 7. Koeficijenti apsorpcije zvuka α za česte građevne materijale [18]	35
Tablica 8. Ponašanje izolatora ovisno o odnosu f/f_n [18]	36
Tablica 9. Svojstva pojedinih čestih materijala s obzirom na okolišne i regulatorne čimbenike [18]	38
Tablica 10. Pregled tipičnih materijala u kontroli buke i vibracija [18]	39
Tablica 11. Tehničke specifikacije dozimetra [19]	44
Tablica 12. Usporedba produktivnosti pojedinih postupaka nanošenja premaza [24]	55
Tablica 13. Podjela najčešće korištenih podloga za premazivanje prema magnetičnosti [25]	63
Tablica 14. Izbor mjerača debljine [25]	65
Tablica 15. Minimalne propisane debljine premaza, ovisno o karakteru okoline [23]	66
Tablica 16. Pojedine karakteristike Fonochrom premaza [46]	84
Tablica 17. Rezultati ispitivanja	87

POPIS OZNAKA

Oznaka	Veličina	Jedinica
A	površina apsorpcijskog materijala	m^2
C	kapacitet kondenzatora	F
E	Youngov modul elastičnosti	N/mm^2
E'	modul pohrane	N/mm^2
E''	modul gubitka	N/mm^2
f	frekvencija vala	Hz
f_n	prirodna rezonantna frekvencija izolatora	Hz
I	intenzitet zvuka	W/m^2
I_0	intenzitet zvuka na pragu čujnosti	W/m^2
$L_{A,eq}$	najviša dopuštena razina buke	dB
L_{eq}	ekvivalentna razina buke	dB
L_I	razina intenziteta zvuka	dB
L_p	razina zvučne snage	W
n	broj titraja	-
P	snaga zvuka	W
P_0	referentna snaga zvuka	W
R	konstanta prostorije	$\text{m}^2 \text{ sabini}$
S	površina metalne pločice	m^2

STC	razred zvučne transmisije	-
T	period titraja	s
t	vrijeme titranja	s
$\tan \delta$	faktor gubitka	-
T_C	temperatura zraka	°C
TL	transmisijski gubitak	dB
v	brzina širenja vala	m/ s
v_{zvuka}	brzina zvuka	m/ s
α	koeficijent apsorpcije zvuka	-
δ	debljina prevlake	mm
ϵ_0	dielektrična konstanta vakuumu	F/ m
ϵ_r	relativna dielektričnost prevlake	F/ m
λ	valna duljina	m

SAŽETAK

U radu je obrađena tematika uloge premaza u zaštiti od buke.

Kako je buka subjektivizirani oblik zvuka, obrađeni su fizikalni i akustički aspekti zvučnoga vala. Tada je buka diferencirana kao specifičan zvučni oblik (koji na čovjeka, uslijed dužeg izlaganja, može ostaviti fizičke i mentalne posljedice), te se prišlo opisivanju buke u industriji- kako ona utječe na rad zaposlenika, koje zakonske regulative štite radnika od posljedica dugotrajne izloženosti buci, koji se mehanizmi zaštite od buke primjenjuju u industrijskom okruženju te kako se buka uopće i mjeri.

Premazi su opisani svojim sastavom, te su detaljno opisane metode nanošenja premaza i mjerenja njegove debljine (u suhom i mokrom stanju). Detaljno je razrađena uloga premaza u službi zaštite od industrijske buke te su pobrojani mehanizmi koji im to omogućuju. Prepoznata je i uloga nanočestica, kao sve popularnijeg materijala, koje dodatno naglašavaju karakteristike zvukovno prigušujućih premaza.

U eksperimentalnome je dijelu obavljeno preliminarno ispitivanje komercijalnog Fonochrom premaza za zaštitu od buke.

SUMMARY

This paper deals with the role of coatings in noise protection.

Since noise is a subjectivized form of sound, physical and acoustical aspects of the acoustic wave have been tackled. Noise has been differentiated as a specific sound form (that can, in the conditions of prolonged exposure, bring harm to both physical and mental well-being of a man), after which the spotlight has been brought to the industrial noise-how it affects the work of an employee, what are the law regulations that ensure protection against it, which mechanisms of noise protection are enforced in industry and how can one measure noise in the first place.

The composition of coatings, the means of coating deposition and the coating thickness measurement techniques (both wet and dry) have been described. The role and basic principles of coatings in industrial noise protection have been elaborated in detail. Also, the usage of nanoparticles, the ever growing material field that enhances the coatings sound-damping aspects, has been recognised.

In the experimental part of the paper, the preliminary examination of commercial Fonochrom noise protection coating has been carried out.

KLJUČNE RIJEČI

Zaštita od buke

Prigušenje zvuka

Premazi

Nanočestice

KEYWORDS

Noise protection

Sound damping

Coatings

Nanoparticles

1. UVOD

Proizvodni pogon (ili bilo koja druga tvornička hala), najčešće, predstavlja jedno izrazito glasno okruženje. Izvori su te buke brojni- (nerijetko zastarjeli ili ne u potpunosti ispravni) strojevi, obrada materijala ili neki vid unutar- tvorničkog transporta ljudi ili dobara.

Ako razumijemo koliko je ljudsko uho osjetljiv instrument i senzor, jasno nam je kako je, u takvome okruženju, zdravlje pogonskoga radnika u opasnosti. Dugotrajna izloženost bučnom okolišu itekako može (trajno) deteriorirati psihofizičko stanje radnika.

Radnici su, zakonski gledano, zaštićeni; ponuđena im je odgovarajuća zaštitna oprema (koju oni više ili manje savjesno koriste) te su uvedeni određeni preventivski sustavi. Ipak, klinička ispitivanja pokazuju kako to nikako nije dovoljno.

Kao jedno od mogućih (jeftinijih, a jednostavnijih) rješenja toga problema nude se premazi za zaštitu od buke.

2. ZVUK- FIZIKALNE OSNOVE

U ovome ćemo se dijelu izlaganja pozabaviti fizikalnim osnovama zvuka.

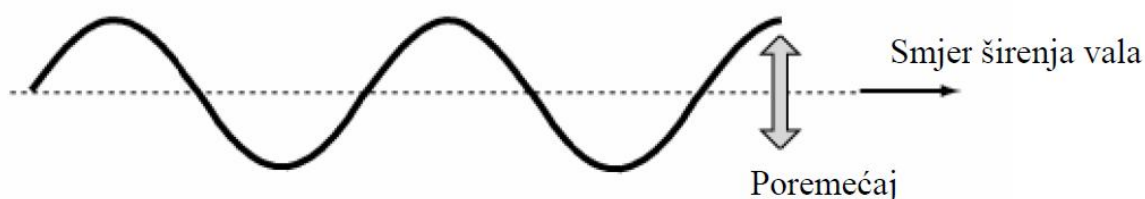
Kako je zvuk, prema svome fizikalnome određenju, oblik vala, valja nam razviti spoznaje o pojavnim oblicima valova, vidjeti u koju sferu, a u tome kontekstu, pripada sam zvuk te upoznati se sa nekim fizičkim pojavama koje vrijede za sve vrste valova, pa tako i zvučne, čineći ta zbivanja akustičkim pojavama.

2. 1. VAL

Val se, kao pojava, može definirati kao poremećaj u nekome mediju. Taj poremećaj propagira medijem (širi se) stanovitom brzinom koja ovisi o fizikalnim obilježjima samoga medija. Val, svojim širenjem, prenosi i energiju zahvaljujući kojoj na svome putu može vršiti neki rad.

Dva su osnovna tipa vala transverzalni i longitudinalni val koji se međusobno diferenciraju prema smjeru oscilacija unutar medija u odnosu na smjer rasprostiranja vala.

U transverzalnih su valova oscilacije koje tvore val okomite u odnosu na smjer širenja vala, kako je i prikazano slikom 1 [1].

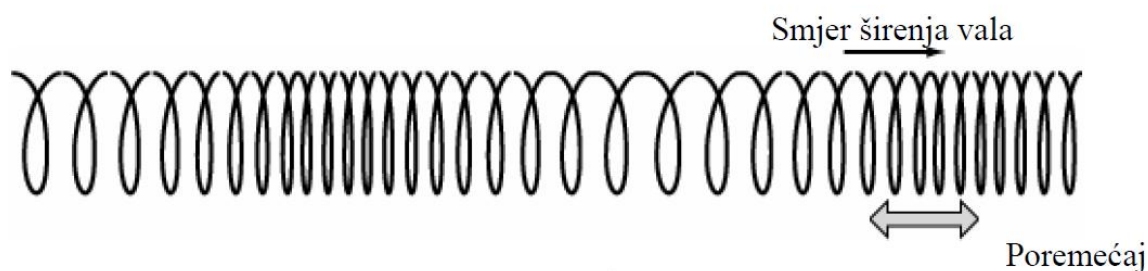


Slika 1. Transverzalni val [1]

Za njihovo je postojanje nužna sila koja se protivi pomicanju jednoga sloja prema susjednome. Takve su sile u fluida (kapljevina i plinova) zanemarivo male ili nepostojeće što, praktično gledano, znači da se transverzalni val u njima ne može razviti. Medij za propagaciju ove vrste vala, samim time, nužno mora biti elastično čvrsto sredstvo [2].

Transverzalne je valove, u svakodnevnome životu, najlakše uočiti na žici nekoga glazbenog instrumenta [1].

Kod longitudinalnih je valova situacija ponešto drugačija. Ovdje se, naime, gibanja oscilacija unutar medija, a koje rezultiraju stvaranjem vala, odvijaju u smjeru širenja vala, što je vidljivo i na slici 2.

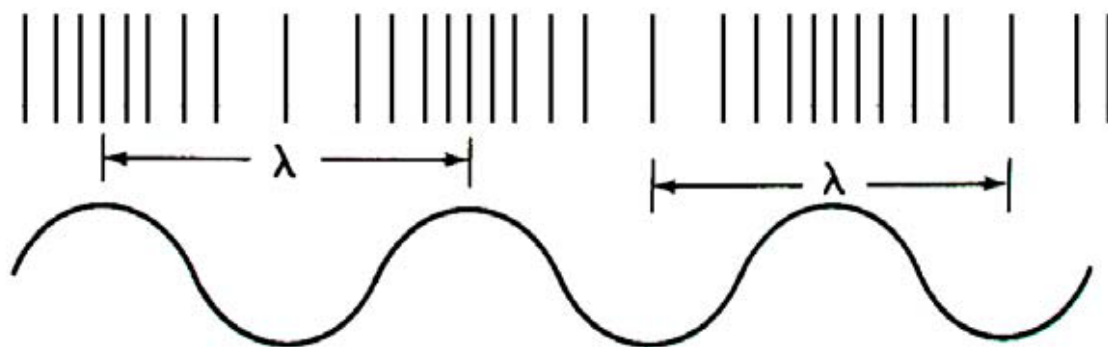


Slika 2. Longitudinalni val [1]

Oni se, očito je, sastoje od niza gušćih i rjeđih dijelova u mediju [1].

Kao medij za propagaciju longitudinalnog vala nude se elastična čvrsta sredstva i, za razliku od transverzalnih valova, plinovi i kapljevine [2].

Obje su (osnovne) vrste valova međusobno komparabilne. Mjesto na kojem je sredstvo „zgusnuto“ je područje gdje je tlak veći od normalnog tlaka, što je analogno brijegu transverznog vala. Princip je primjenjiv i u obratnoj situaciji- mjesto „razrjeđenja“ medija je područje tlaka nižeg od normalnog, što odgovara dolu transverznog vala [1]. Usporedba je jasnija pogledom na sliku 3.



Slika 3. Usporedba transverznog i longitudinalnog vala [1]

2. 2. ZVUK

Zvuk je, kao takav, najlakše definirati kao longitudinalni val određene frekvencije koji se širi kroza medij.

Ova definicija podrazumijeva da tijelo koje proizvodi zvuk nužno mora vibrirati i biti u direktnome kontaktu sa medijem koji taj zvuk prenosi. Tu leži i sva suština principa širenja zvučnoga vala. Taj se mehanizam, naime, temelji na nizu poremećaja ili, točnije, „zgusnuću“ i „razrjeđenju“ sredstva do kojih dolazi uslijed promjena tlaka. Zato zvuk za svoje širenje obavezno zahtjeva i neko sredstvo, što potvrđuje i činjenica da u vakuumu, gdje sredstva za propagaciju zvučnoga vala nema, nikako nema niti zvuka [1].

I dok je spomenuta definicija svakako zgodna za jednostavno objašnjenje fenomena zvuka, njen je karakter ipak preopćenit.

To je razlog zašto se danas, kao najčešće prihvaćena determinacija zvuka, uzima slijedeća definicija: zvuk je svaka vremenski promjenjiva mehanička deformacija u elastičnoj sredini.

Ovdje su, kako i spada, pokriveni svi pojavni oblici zvuka. Naglasak je, pri tome, stavljen na vremensku promjenjivost deformacija jer su, i u elastičnim sredinama, moguće deformacije vremenski nepromjenjivog karaktera te one, kao takve, nisu zvuk, a savršen je primjer za to plastična deformacija materijala.

Ovakvim se definiranjem zvuka može ući i nešto dublje u problematiku njegova širenja, negoli je to prvotna (općenitija) definicija dopuštala. Polazeći, tako, od definicije zvuka kao vremenski promjenjive mehaničke deformacije, dolazi se do definicije zvučnoga vala kao mehaničkoga valnog kretanja koje nastaje mehaničkim oscilacijama u materijalu. Uvjet je, za takvu oscilatornu pojavu, masa molekula ili čestica koje osciliraju i, time, svojom inercijom sudjeluju u pojavi kretanja, te postojanje stanovitih unutrašnjih elastičnih sila koje teže tome da sredinu vrate u njeno početno stanje, stanje zatečeno prije pojave deformacija [3].

Pojednostavljeno, navedeno znači da se, kod valnog gibanja, kroz sredstvo prenošenja vala giba samo elastični poremećaj, no ne i medij; on ostaje nepomičan [2].

Zato se mehaničke oscilacije koje čine zvuk mogu javljati u plinovima, kapljevinama, pa i krutim tijelima, no ne i u amorfim tijelima (jer nema unutrašnjih elastičnih sila da vraćaju sredinu u njeno početno stanje nakon nastanka deformacije) i, kako je već spomenuto, vakuumu (jer nema mase koja bi mehanički oscilirala).

Samim time, nameće se zaključak da postoje razlike u načinima kako se procesi širenja zvučnoga vala odvijaju u, sa jedne strane, čvrstim tijelima, a sa druge strane, u fluidima. Konkretnije, to znači kako će se, u kapljevinama i plinovima, zvučne pojave odvijati prema općim zakonitostima koje određuju ponašanje fluida, što će se diferencirati od pojavnih fizikalnih zakona u čvrstim tijelima [3].

2. 2. 1. FREKVENCIJA ZVUKA I VALNA DULJINA

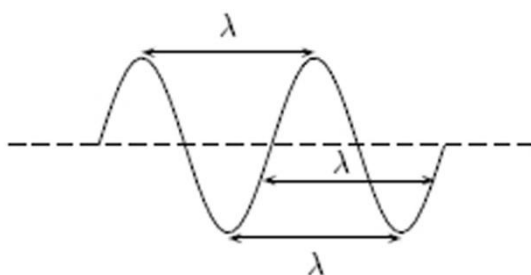
Svaki harmonijski val, pa tako i zvučni, možemo percipirati oblikom harmonijskoga titranja. On, stoga, posjeduje dvije vrlo bitne osobine- vlastitu frekvenciju f [Hz] i valnu duljinu λ [m].

Frekvencija harmonijskoga vala f se definira kao broj titraja u sekundi, kako je dano jednačbom (1), ili kao recipročna vrijednost perioda titraja T , prikazano jednačbom (2).

$$f = \frac{n}{t} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

Ovdje je period titranja T vrijeme u kojem se obavi jedan titraj, dok je valna duljina harmonijskog vala λ duljina razmaka između dvije točke (ili čestice) koje titraju sinkrono, kako se i vidi na slici 4 [2].



Slika 4. Valna duljina [4]

Valna se duljina, kako za zvučne, tako i za ostale vrste valova, relacijom prikazanom jednadžbom (3) može povezati sa frekvencijom.

$$v = f \cdot \lambda \quad (3)$$

Ovdje je v brzina širenja vala, f frekvencija, a λ valna duljina [1].

2. 2. 2. BRZINA ZVUKA

Kako je slučaj i u ostalih valova, i zvuk može, ovisno o sredstvu u kojem se širi, putovati različitim brzinama.

Točna će brzina širenja zvuka u nekome sredstvu, tako, ovisiti o njegovoj elastičnosti i gustoći. Konkretnije, brzina će ovisiti o tome koliko se daleko molekule medija mogu odmaknuti od ravnotežnog položaja (elastičnost medija) te koliko su te molekule međusobno udaljene (gustoća medija). Što je elastičnost medija veća, a njegova gustoća manja, to će se zvuk brže širiti kroza medij.

Na brzinu će širenja zvuka utjecati i promjena temperature. To je i logično jer povećanje temperature smanjuje gustoću medija, no bez utjecaja na elastičnost. Stoga se brzina zvuka u zraku, nama najinteresantnijem mediju, može dati jednadžbom (4), iz koje slijedi da je brzina zvuka u zraku temperature 20 °C 343, 6 m/ s.

$$v_{zvuka} \approx 331,4 + 0,6 \cdot T_C \quad (4)$$

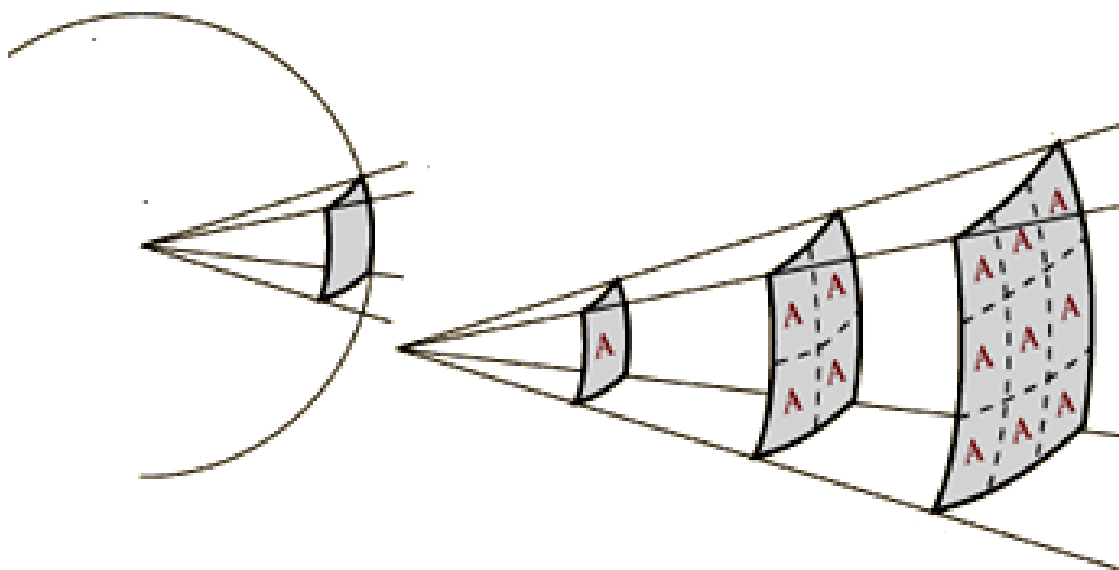
Brzina zvuka je, ovdje, dana u m/ s, dok je temperatura T_C iskazana u °C.

Zanimljivo je konstatirati da, za razliku od temperature, tlak ne utječe na brzinu širenja zvuka. Tome je tako jer promjena tlaka uzrokuje jednake promjene u elastičnosti i gustoći, što brzinu ostavlja netaknutom [1].

2. 2. 3. INTENZITET ZVUKA

Ako točkasti izvor koji emitira zvuk zamislimo u vidu sfere koja se širi od izvora u prostor, a kako je to i prikazano na slici 5, primijetit ćemo da se, uz povećanje sfere, njezina

površina udaljuje od točkastog izvora zvuka, a ista količina energije se jednostavno distribuira na veće područje, što rezultira smanjenjem intenziteta zvuka.



Slika 5. Točkasti izvor zvuka i sferno širenje zvuka kroz prostor [1]

To je razlog zašto zvuk čujemo tiše ako je izvor udaljeniji od nas.

Shodno tome, možemo zaključiti da, što je veća amplituda zvučnog vala, to je veća i glasnoća, a i intenzitet zvuka. Kvadrat amplitude vala proporcionalan je intenzitetu zvučnog vala.

Ovo je očito ako, u sferi svakodnevnoga života, promotrimo žicu gitare. Što se žicu jače trzne, ona se više otkloni od svoga ravnotežnog položaja. Amplituda je zvučnoga vala, samim time, veća, a nastali zvuk glasniji.

Intenzitet zvuka, za razliku od njegove amplitude, nije teško izmjeriti. On se može opisati kao energija koju prenese val u nekome vremenu, po jedinici površine valne fronte, a izražava se u W/m^2 .

Zvuk obično mjerimo kao razinu intenziteta. Ovdje valja razlikovati stvarni intenzitet od razine intenziteta jer je skala razine intenziteta prilagođena ljudskoj percepciji glasnoće te se izražava u decibelima (dB).

Matematička relacija koja povezuje intenzitet zvuka (u W/m^2) i razinu intenziteta (u dB) dana je jednadžbom (5).

$$L_I(\text{dB}) = 10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (5)$$

Tablicom 1 dat je prikaz zvukova koje svakodnevno susrećemo, zajedno sa pripadajućim intenzitetima [1].

Tablica 1. Svakodnevni zvukovi i njihovi intenziteti [1]

Zvuk	Razina intenziteta (dB)	Intenzitet (W/ m ²)
<i>Prag čujnosti</i>	0	$1 \cdot 10^{-12}$
<i>Šapat</i>	10	$1 \cdot 10^{-11}$
<i>Razgovor</i>	60	$1 \cdot 10^{-6}$
<i>Rock glazba</i>	115	0,30
<i>Prag boli</i>	120	1,00
<i>Puknuće bubnjića</i>	160	$1 \cdot 10^4$

2. 2. 4. BOJA ZVUKA

Iako tako ne zvuči, boja zvuka je, u fizikalnim razmatranjima, po važnosti svrstana u isti rang kao i frekvencija i intenzitet.

Ovaj pojam opisuje one karakteristike zvuka koje omogućavaju razlikovanje u slučaju kada dva ili više različitih zvukova imaju istu frekvenciju i intenzitet. Boja zvuka je uglavnom određena udjelom viših harmonika (svojevrsnih dodatnih frekvencija) koji se, uz osnovnu, pojavljuju više ili manje izraženo u svakome zvučnom koraku. Boji zvuka, u jednome manjemu dijelu, doprinose i dinamičke karakteristike zvuka (primjerice vibracije).

U našoj svakodnevici, boja zvuka omogućava razlikovanje ljudskih glasova, glazbenih instrumenata i slično.

Kako svaki zvuk, koji se sastoji od više harmonika, posjeduje karakterističan valni oblik, on se može razjediniti na osnovne harmonike pri čemu je moguće odrediti doprinos svake frekvencije u valnome uzorku. Taj se postupak naziva Fourierova analiza [1].

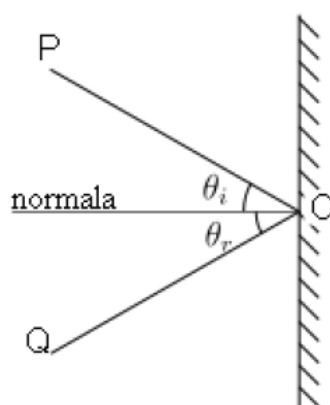
2. 2. 5. OSTALE BITNIJE AKUSTIČKE POJAVE

Akustičke su pojave, u svojoj osnovi, valne prirode te se valovi zvuka ponašaju kao i svi drugi valovi. Stoga je, za valjano shvaćanje biti zvuka, potrebno poznavati i neke druge fizikalne zakonitosti koje zvuk prati, a koje nešto jasnije razotkrivaju njegovu valnu pojavnost.

U tom će se vidu tek ovlašt dotaknuti pojmovi interferencije valova, njihovo svojstvo refleksije i refrakcije te Dopplerov efekt.

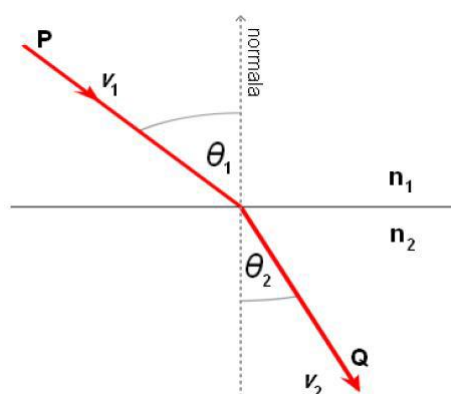
Interferencija je pojava koja se javlja kada se dva vala, u svome međudjelovanju, u određenome trenutku nađu u zajedničkom dijelu prostora. Tada dolazi do interakcije njihovih amplituda te se, u slučaju zbrajanja tih amplituda, radi o konstruktivnoj, a u slučaju njihova međusobna poništavanja, destruktivnoj interferenciji. Posljedica interferencije je nastanak udara, područja izmjeničnog povećanja i smanjivanja amplitude resultantnog vala [1].

Refleksija zvuka slijedi opći zakon valne refleksije: kut upada vala jednak je kutu odbijanja, kako je i prikazano slikom 6. Ona, ovisno o stanju površine materijala na kojega val nailazi, može biti zrcalna ili difuzna [5]. Važno je primijetiti da odbijeni val može interferirati sa upadnim valom te, na taj način, proizvoditi uzorke konstruktivne ili destruktivne interferencije [1].



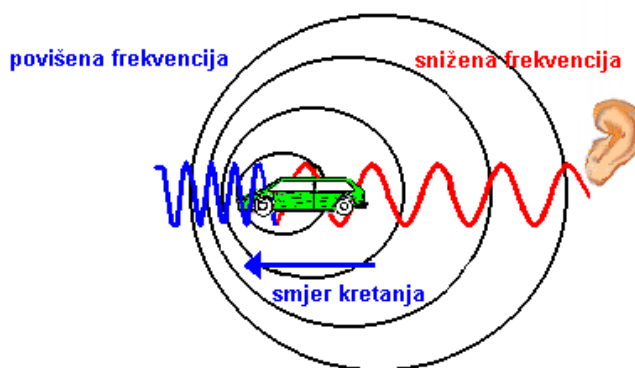
Slika 6. Refleksija zvuka [5]

Refrakcija je pojava zakretanja valova koja se javlja kada oni prelaze iz jednoga propagacijskog sredstva u drugo, čime dolazi do promjene brzine vala. Naime, za svako se sredstvo može identificirati indeks loma koji govori koliko će dano sredstvo usporiti gibanje vala. Zakon refrakcije kaže da će se, zbog promjene brzine gibanja vala, promijeniti i njegov smjer širenja [5]. Princip refrakcije vala grafički je dočaran slikom 7.



Slika 7. Refrakcija vala [5]

Dopplerov efekt je pojava kod koje dolazi do promjene frekvencije zvuka svaki puta kada postoji relativno gibanje između izvora i promatrača. Efekt postaje jasno uočljiv kada relativna brzina gibanja iznosi barem nekoliko postotaka brzine zvuka (20- 25 m/ s). Ako se izvor zvuka, primjerice, giba prema opažaču, to će gibanje uzrokovati promjenu registrirane valne duljine i frekvencije, pa i usprkos tome što frekvencija izvora ostaje nepromijenjena. Valna duljina se smanjuje, a, kako je brzina zvuka konstantna, veći broj valnih fronti dolazi do promatrača u određenome vremenskom intervalu, što stvara dojam povećanja frekvencije. Nakon prolaska izvora kraj opažača, frekvencija se smanjuje i povećava se valna duljina [1]. Dopplerov je fenomen slikovito prikazan slikom 8.



Slika 8. Dopplerov efekt [6]

3. BUKA

Buka se, najčešće, definira kao neželjeni uznemiravajući zvuk koji se rasprostire titranjem čestica u zraku [7]. Samom svojom definicijom, buka je, dakle, svedena na subjektivni dojam pojedinca- ono što je jednoj osobi buka, drugoj možda nije. Isto tako, ono što je buka za većinu ljudi, ne mora nužno biti buka i za svaku individuu.

Ipak, valja prepoznati da se štetno djelovanje buke, sa ovog ili onog aspekta, nikako ne zasniva na promišljanju pojedinca o terminu „buka“; ako se, primjerice, određena granica razine zvuka prekorači (pri čemu svakako već duboko zadiremo u područje buke), doći će do oštećenja sluha, smatrao pogođeni pojedinac taj zvuk (i njegovu razinu) bukom ili ne [8].

Također, valja imati na umu da buka jest, iako ponešto specifičniji oblik, tek zvuk te da, ako ju ogolimo konteksta kojeg joj daju ljudi uslijed zamjećivanja njenog utjecaja na njihovo psihofizičko stanje, ona, kao takva, mora slijediti akustičke (valne) zakonitosti ranije izvedene u ovome izlaganju.

Buku ćemo, tako, moći dijeliti prema načinu širenja, gdje ćemo diferencirati zračnu od strukturne buke, prema mjestu izvora, čime ju dijelimo na unutarnju i vanjsku, te prema putovima prodiranja, gdje ćemo ju, prema frekventijskom području, baš kao i regularni zvuk, dijeliti na infrazvučnu (do 16 Hz), zvučnu (16 Hz do 20. 000 Hz) i ultrazvučnu (iznad 20. 000 Hz). Također, prema načinu djelovanja, buku ćemo razlikovati kao kontinuiranu ili isprekidanu [7].

Očito je da buka nikako nije jednodimenzionalan problem te kako njeno sagledavanje zahtijeva stanoviti odlazak u dubinu problema. Da bi taj pregled bio što jasnije (i sistematičnije izveden), problem buke ćemo sagledati sa tri različita (no vezana) stajališta: fizikalno- tehničkog, medicinsko- zdravstvenog i socijalnog- pravnog, no ne prije nego što steknemo saznanja o izvorima buke.

3. 1. IZVORI BUKA

Prema suvremenom je shvaćanju izvore zvuka, pa tako i buke, moguće podijeliti na dvije opće grupe: zvukove koji se stvaraju u prirodi i zvukove čiji je izvor neka ljudska djelatnost ove ili one vrste [8]. Prirodni su zvukovi, primjerice, zvuk mora i vjetra, grmljavina,

glasanje životinja, buka erupcije vulkana ili šuštanje vode jednog vodopada. U neprirodne bismo zvukove mogli uvrstiti one stvorene radom različitih pumpi, industrijskih postrojenja i strojeva ili kućanskih aparata te zvuk vjetrenjače ili prometa (cestovnog, morskog i zračnog), pa čak i glazbu [9].

Bitno je prepoznati kako, po pitanju štetnosti, zvuk proizveden ljudskim činom može (no i ne mora) biti štetan po zdravlje čovjeka, što (gotovo nikad) nije slučaj sa zvukom koji se stvara u prirodi.

Mjesto gdje nastaje zvuk, kasnije prepoznat kao buka, naziva se izvorom buke. U realnom okruženju i konkretnoj situaciji, izvor buke ne mora biti jedan, već ih može biti nekoliko ili čak mnogo.

Da bismo mogli definirati izvor buke, valja nam poznavati najmanje dvije veličine: razinu zvučne snage i usmjerenost.

Razina zvučne snage jest mjerilo ukupne energije koju izvor buke zrači u jedinici vremena u svim pravcima. Ona se uobičajeno iskazuje trećinama oktava ili oktavama. Izraz koji opisuje razinu zvučne snage dat je jednadžbom (6).

$$L_P = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (6)$$

Ovdje valja pripomenuti da je P_0 referentna zvučna snaga koja iznosi $P_0 = 10^{-12}$ W.

Izvor buke obično neće zračiti zvuk podjednako u svim smjerovima, pa se i njegova usmjerenost mora uzeti u obzir [8]. Usmjerenost je karakteristika ovisna o frekvenciji, odnosno broju promjena tlaka u sekundi [10].

3. 2. FIZIKALNO- TEHNIČKI ASPEKTI BUKE

Kako smo se u ranijem dijelu ovoga rada pozabavili za zvukom (a buka, u svojoj srži, jest zvuk) i njegovim tehničkim danostima, zanimljivo je sagledati što buku čini drugačijom.

Fizikalno gledano, razina buke je isto što i razina zvuka te se i ona, stoga, izražava u decibelima u odnosu na istu referentnu veličinu zvučnog tlaka od 20 μ Pa. Međutim, uočeno

je da razina zvuka, kada ima i određeni promjenjivi karakter, polučuje različito djelovanje na čovjeka i da taj rezultantski učinak ovisi o načinu na koji se razina mijenja. To je razlog zašto se kod buke govori i o vremenskim karakteristikama razina. Ako zbrojimo sve trenutne razine zvuka, uzimajući ih, pri tome, dovoljno gusto, i podijelimo ih sa njihovim brojem, dobit ćemo srednju razinu buke koja se, naravno, uvijek odnosi samo na promatrani vremenski interval u kojem smo brojali i mjerili trenutne razine.

Po pitanju trajanja, buka može biti vrlo različita u svojim pojavnim oblicima i načinima. Trajanje buke vezano je uz vremenski oblik njene razine. Najjednostavniji se oblik, jasno je, postiže kada je razina buke konstantna u vremenu, što, primjerice, u strojarskoj sferi, odgovara zvuku zujanja transformatora. Kod svih se oblika promjenjive buke diferencijacija provodi shodno tome mijenja li se razina buke ritmički ili nepravilno. Pri tome se, također, opaža mijenja li se spomenuta razina u sporij ili bržim manirima te su, tako, udari sporiji ili brži i ritmički ili nepravilnog ritma. Vidljivo je da je klasifikacija buke prema vremenskom obliku njene razine izvedena na osnovi subjektivnog osjećaja buke čovjeka i to baš zbog činjenice da će on drugačije reagirati na konstantnu buku, a, opet pak, drugačije na onu koja se mijenja.

Buka se, prema svome spektru, može (okvirno) dijeliti na trenutni i srednji spektar buke. Trenutni je spektar onaj koji postoji u jednome trenutku. Pri tome je pojam „trenutka“, a kako ne bi bilo potrebe za ulaskom u neke egzistencijalističke sfere, vezan osobinama (i ograničenjima) uređaja kojime mjerimo spektar te, kako god bilo, predstavlja vrlo kratak vremenski interval. Definirajući trenutni spektar, lakše je pojasniti i srednji spektar buke; radi se o srednjoj vrijednosti trenutnih spektara za neki duži vremenski interval. Analogno tome, može se zaključiti da, kada se govori o spektru buke, smatra se da je on, u principu, promjenjiv s vremenom. Razlikovat ćemo tri vrste spektra: linijski (diskontinuirani), koji sadrži samo osnovne periodičke komponente, kontinuirani, koji sadrži sve moguće komponente u određenom frekvencijskom intervalu, i kombinirani spektar buke, koji, u načelu, predstavlja kombinaciju prvih dvaju spektara. Oblik spektra buke pokazuje stanovite pogodnosti podjele frekvencija na tri opsega: niske frekvencije (ispod 100 Hz), srednje frekvencije (100 Hz do 5. 000 Hz) i visoke frekvencije (iznad 5. 000 Hz). Prema ovoj podjeli, spektar može imati izražen bilo koji opseg, a ako su sva tri opsega barem približno jednoliko zastupljena, govorimo o ujednačenome spektru [8].

Za opisivanje okolišne buke (standardno) se koristi ekvivalentna razina buke u decibelima A (L_{Aeq} u dB (A)) pri čemu valja reći da je A karakteristika subjektivne glasnoće, ovisna o frekvenciji, prema preporuci IEC (engl. International Electrotechnical Commission- Međunarodna elektrotehnička komisija) [10]. Izraz ekvivalentne razine buke dat je jednadžbom (7).

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T p_A^2 dt / p_{ref}^2 \right) \quad (7)$$

Ovisno o određenim čimbenicima pojedine lokacije (primjerice, njenoj namjeni), zakon će propisati dozvoljenu ekvivalentnu razinu buke, nerijetko ovisno i o dijelu dana.

3. 3. BUKA SA MEDICINSKO- ZDRAVSTVENOG STAJALIŠTA

Zvučne se pojave, prvenstveno, manifestiraju i djeluju preko organa sluha, no njihov učinak se ne očituje samo na njemu, već se prenose i na ostale dijelove tijela.

Ljudsko se uho, tokom dugih godina trajanja humanoidne egzistencije na Zemlji, prilagodilo uvjetima života u relativnoj tišini gdje su svi jači zvuci izvorišno pripadali prirodi. Ipak, razvoj ljudske civilizacije nas je, kroza svoje etape, doveo i do pojave industrijske revolucije kada otpočinje porast opterećenja na ljudsko uho umjetnim zvukovima na koje se ono još ni danas nije stiglo u potpunosti evolucijski prilagoditi. Samim time, nameće se pitanje atavističke prirode ljudske neprilagođenosti određenim razinama buke, razinama koje negativno utječu na čitavo ljudsko tijelo.

Buka, nastala iz, za ovu potrebu, nedefiniranog izvora, doći će do pojedinca, opažača te buke, te će se prenijeti na njegov živčani sustav, a, preko njega, i na ostatak organizma, dugoročno uzrokujući razne poremećaje. Valja prepoznati da buka, osim u određenim ekstremnim slučajevima, na čovjeka ne djeluje trenutačno, već kroza duže vremensko razdoblje, akumulacijski. Ta je dugoročnost, ujedno, i razlog zašto ljudi na buku, a u svrhu prevencije nastanka stanovitih poteškoća, rijetko reagiraju pravovremeno te zašto se problemu suzbijanja buke ne pristupa sa većom pozornošću [8].

Na buku će prvo reagirati vegetativni živčani sustav ili, konkretnije, simpatikus; grana aferentnog živčanog sustava koja je naročito aktivna tijekom čuvstvenih reakcija poput

straha i tjeskobe koje troše tjelesne zalihe energije. Simpatikus širi zjenice, smanjuje izlučivanje sline, ubrzava disanje i rad srca, pojačava izlučivanje hormona adrenalina iz nadbubrežne žlijezde te usporava rad crijeva i pražnjenje mokraćnog mjehura [11].

Reakcije ljudskoga tijela na buku vidljive su iznad 60 dB, a osobito iznad 80 dB [8].

Štetan će se i akumulirajući utjecaj buke prvenstveno manifestirati kroz loše raspoloženje, umor, nesanicu, glavobolju, gubitak koncentracije (što se očituje i kao smanjenje radne sposobnosti) no i, u konačnici, trajno oštećenje sluha.

Za razdražljivost pojedinca, po pitanju buke, osim glasnoće bitna je i vrsta buke (primjerice, razlika između glasne glazbe, laveža psa ili industrijske buke) te, ako pričamo o nekom domicilnom i neradnom okruženju, doba dana.

U svome su privatnome okruženju ljudi, dakako, na buku najosjetljiviji tokom spavanja kada se prag smetanja može identificirati oko 45 dB (A) ili niže. Kao referenca za usporedbu ovoga podatka, može nam poslužiti činjenica da je početak interferencije govorne komunikacije 63 dB (A) ili, ugrubo, razina zvuka normalne glasnoće između dvoje ljudi odvojenih jedan metar.

Primarni je učinak buke stezanje mišića srednjeg uha koji zakreću koščiće tako da se smanji njihov hod i pritisak na pužnicu. Na to će utjecati i frekvencija, trajanje te spektralni sastav zvuka [12].

Prema frekvencijskim karakteristikama razlikujemo efekte buke čujnog spektra, ultrazvuka i vibracija.

Buka čujnog spektra je, praktički, najznačajnija i najčešće se susreće u industriji, gradovima i kućanstvu te je, samim time, njeno djelovanje i najraširenije. Specifičnost reakcije ljudskoga uha na djelovanje buke u čujnom spektru proizlazi iz samih začetaka ljudske evolucije. Naime, organ se sluha u živih organizama počeo razvijati tek u fazi prelaska životinja iz vodenog životnog okruženja na kopno jer tek na kopnu, zvuk kao podražaj, dobiva svoj puni značaj. Kako je taj razvoj bio prilično nagao i brz, nije bio popraćen odgovarajućom opskrbom ušnog područja krvlju te je ljudsko uho, i do danas, ostalo relativno slabo prokrvljeno. Dio pužnice uha koji registrira visoke tonove od 3 do 6 kHz je naročito slabo

prokrvljen, a uz to je i smješten na način da je prvi izložen djelovanju zvučnih valova. Zato jaki zvučni impuls direktno i mehanički oštećuje taj dio pužnice, dok će zvučni impuls slabijeg karaktera, djelovanjem na središnji živčani sustav, uzrokovati grčenje krvnih žila gdje će, opet, trpjeti najslabije prokrvljeni dio. To je razlog zašto se spektar frekvencija u rasponu od 3 do 6 kHz smatra kritičnim za ljudsko uho te baš oko tih frekvencija započinje razvoj naglušnosti i gluhoće u pojedinca, a uslijed dugoročne izloženosti buci, dok se gluhoća na niskim frekvencijama razvija nešto sporije. Buka čujnog spektra djelovat će na središnji živčani sustav, glas, govor i komunikaciju, žlijezde, sustav za ravnotežu, organ vida, sastav krvi, ravnotežu elektrolita te probavni sustav.

Infrazvuk je zvuk koji se locira ispod granice čujnog spektra (20 Hz) no kojeg se ipak, uz dovoljno jak intenzitet, može čuti. Tipični su primjeri infrazvuka buka grmljavine te zvuk aviona ili rada klima uređaja. Infrazvuk može uzrokovati nestabilnost, vrtoglavicu, tjeskobu, izraženu tugu, nervozni osjećaj gnušanja ili straha, trnce niz kralježnicu, osjećaj pritiska u grudima te manjak koncentracije, a može doći i do rezonancije s vlastitim frekvencijama pojedinih organa. Ipak, buka infrazvučnog spektra rijetko dolazi sama (bez buke čujnog spektra ili vibracija), a obično je relativno male amplitude te, realno, nema nekih većih i dugotrajnih učinaka na zdravstveno stanje čovjeka. U ovom se području javljaju vibracije, odnosno oscilacije na niskim frekvencijama koje se, kako je već rečeno, obično javljaju uz infrazvuk. Prenose se direktnim dodirima, a savršen primjer vibracija jest buka rada pneumatske bušilice. Kod duže izloženosti vibracijama, može doći do „vibracijske bolesti“, oboljenja čiji su simptomi bolovi u mišićima i zglobovima, gubitak osjeta boli i dodira na prstima ili, u težim slučajevima, čak i atrofija mišića.

Ultrazvuk će, uz dovoljno jaki intenzitet (iznad 100 dB), dovesti do glavobolje, osjećaja smušenosti i mučnine, vrtoglavice, pospanosti, razdražljivosti, sporijih refleksnih reakcija, povišenja temperature, bljedila kože i slično. Ipak, on se relativno teško prenosi zrakom pa je lagano zaštititi se od njega [8]. Ultrazvuk se ne može osjetiti kao zvučni ton, već kao određena vrsta pritiska u uhu ili glavi [12].

U pogledu trajanja buke, valja reći da se, za zvukove koji traju više od pola sekunde, a nalaze se u čujnom području čovjeka, jačina stezanja mišića povećava povećanjem

intenziteta i to počevši od 85 dB do 90 dB glasnoće za čiste tonove, odnosno od 70 dB do 75 dB za širokopojasni zvuk.

Buka će dovesti i do drugih vidljivih promjena na tijelu, a sa kojima smo se svi, vjerujem, susreli; trenutna kontrakcija orbitalnih očnih mišića koji zatvaraju kapke (žmirkanje) i kontrakcija nekih mišića nogu, ruku ili leđa koji izazivaju blagi grč, te refleks okretanja glave i očiju u smjeru izvora zvuka svima su nam poznate pojave.

Jačina je tjelesne reakcije na zvuk proporcionalna intenzitetu zvuka te obrnuto proporcionalna vremenu porasta zvuka. Na reakciju, također, utječe i neočekivanost zvuka te pozadinska buka. Jačina mišićnog refleksa najviše raste za razine zvučnog tlaka između 90 dB i 120 dB.

Zanimljivo je promotriti i subjektivne ocjene izloženosti zvuku visokog intenziteta. Reakcije zdravih pojedinaca na izloženost zvuku visokog intenziteta date su tablicom 2, zajedno sa odgovarajućom razinom intenziteta.

Tablica 2. Reakcije zdravih pojedinaca na određenu glasnoću zvuka [12]

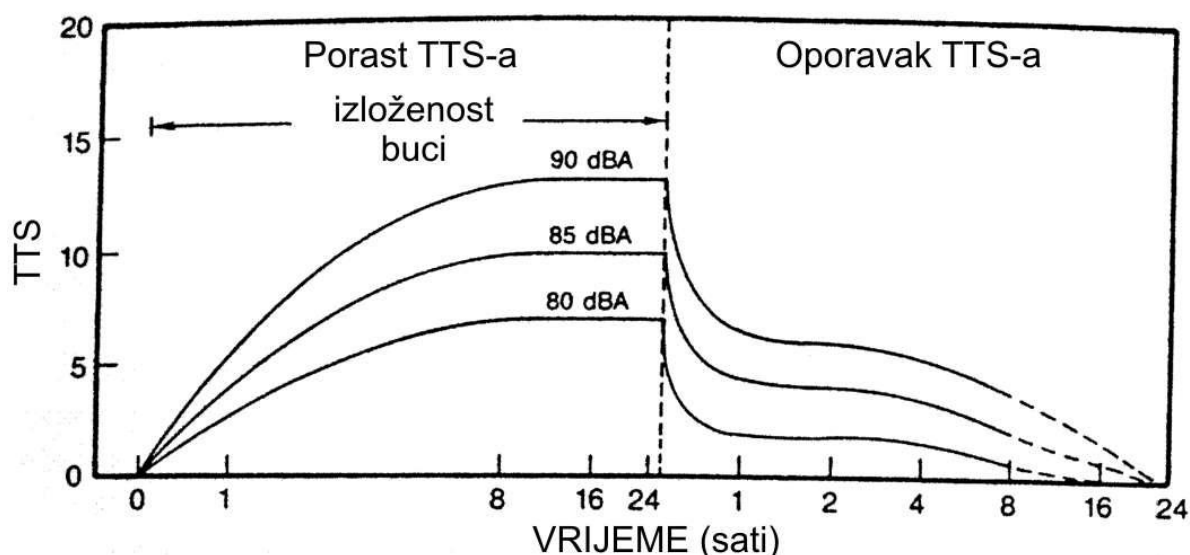
GLASNOĆA ZVUKA	REAKCIJA POJEDINCA
Oko 120 dB	Nelagoda
Oko 130 dB	Škakljanje
Oko 140 dB	Bol

Prikazani su rezultati zanimljivi jer su komparativni sa rezultatima dobivenima u ispitivanju provedenom na gluhim osobama. One su izdržale buku do 170 dB zvučnoga tlaka bez osjećaja boli što, analogno, pokazuje da je bubnjić primarni izvor boli.

Kako je već ranije rečeno, buka može uzrokovati i gubitak ravnoteže. Do te pojave dolazi uslijed izloženosti vrlo glasnoj buci tek kod zvučnih tlakova od oko 140 dB, a, ako se buka dovodi na samo jedno uho, već iznad 100 dB.

Mjerljivo najuočljivija posljedica buke na sluh jest pomak praga čujnosti. Taj pomak dijelimo na TTS (engl. Temporary Threshold Shift- privremeni pomak praga čujnosti) i PTS (engl. Permanent Threshold Shift- stalni pomak praga čujnosti).

Prikaz ovisnosti promjene TTS- a o vremenu izloženosti buci i razini buke dana je slikom 9.



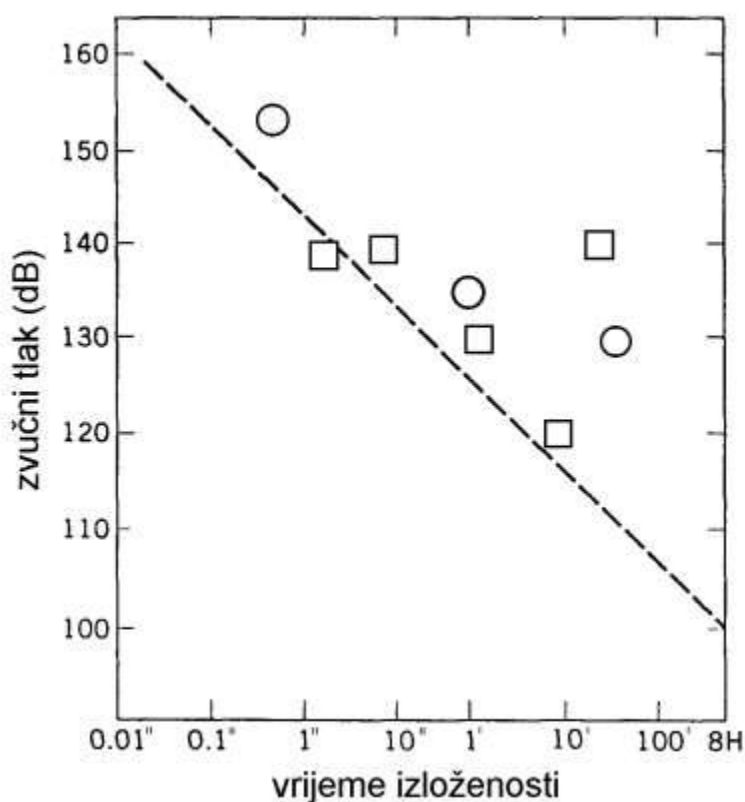
Slika 9. Ovisnost promjene TTS- a o vremenu izloženosti buci i razini buke [12]

PTS se dijeli u dvije kategorije obzirom na razlog nastanka oštećenja; može ga se promatrati kao posljedicu kratkotrajnog djelovanja zvuka vrlo velikog intenziteta (akustička trauma) ili kao posljedicu učestalog izlaganja određenom zvuku ili buci znatno manjeg intenziteta. Kod većine će ljudi izloženost zvučnom tlaku od oko 140 dB, u trajanju od svega pola minute, kao posljedicu imati PTS, a isti će se nesretni rezultat postići kod izloženosti tlaku od 145 dB u trajanju od nekoliko sekundi ili tlaku od 150 dB kroza nekoliko desetinki sekundi trajanja izloženosti.

Puknuće se bubnjića na višim audio frekvencijama očekuje na oko 160 dB.

Iznimke, naravno, uvijek postoje. Tako su zabilježeni slučajevi izlaganja buci bez pojave PTS- a čak i kod razina buke od 159 dB do 180 dB te puknuće bubnjića kod razina od 186 dB do 189 dB.

Interesantno je promotriti rezultate konkretnog istraživanja, prikazane slikom 10, gdje se vidi vrsta oštećenja sluha ovisno od vremena izloženosti buci i adekvatnome zvučnome tlaku. Crtkana linija predstavlja procijenjenu granicu opasnosti od trajnog oštećenja sluha, kvadrati rezultirajuće trajno oštećenje sluha, a kružići slučajeve gdje nije došlo do pojave trajnih posljedica na sluh individue.



Slika 10. Posljedice izloženosti zvuku određene glasnoće u konkretnome vremenskom intervalu [12]

Nagluhost može biti provodna ili konduktivna, kada je uzrokovana patologijom vanjskog zvukovoda, srednjeg uha do ovalnog prozorčića, te osjetna ili perceptivna, u kome ćemo slučaju pričati o nagluhosti senzoričkog tipa, kada je oštećen Cortijev organ, ili o nagluhosti neuralnog tipa, kada je oštećen neuralni put između unutarnjeg uha i mozga. Oštećenje sluha može biti i centralne prirode, zbog patologije središnjeg živčanog sustava. Profesionalna su oštećenja sluha senzoričkog tipa i, u pravilu, ireverzibilna.

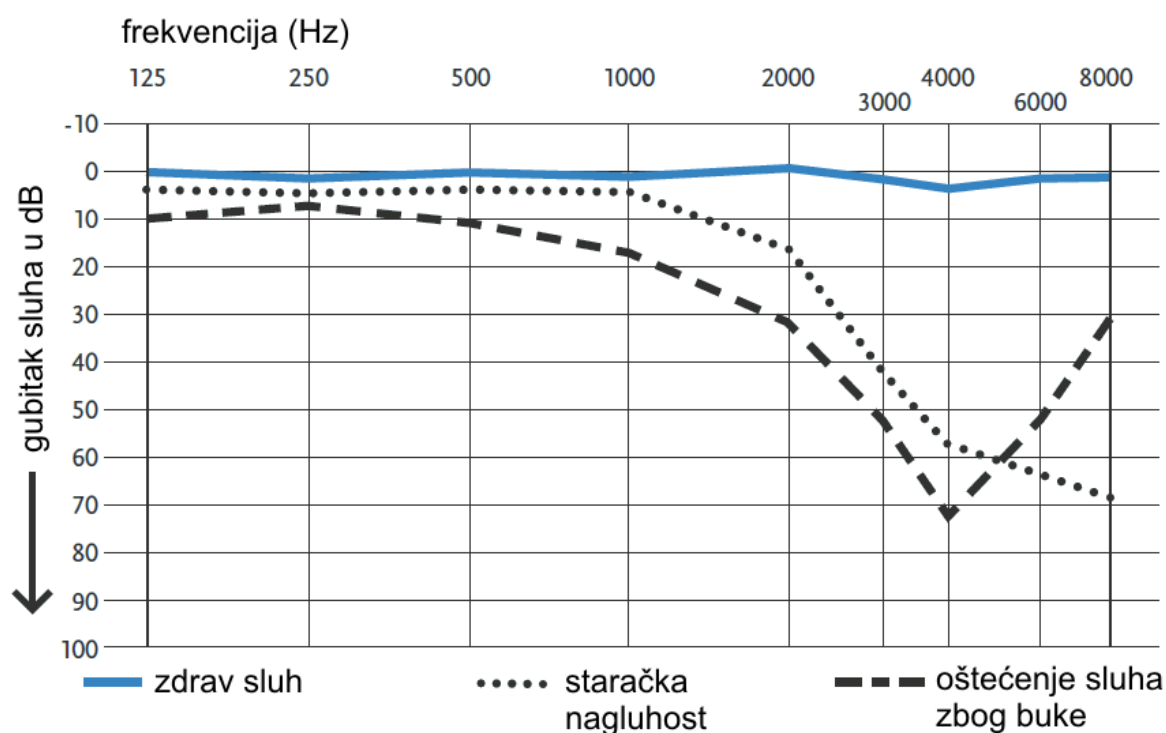
Nagluhost se osobe može gradirati u nekoliko stupnjeva procjene:

- Neznatna nagluhost- osoba ne čuje zvuk razine do 20 dB,
- Lagana nagluhost- osoba ne čuje zvuk razine od 20 dB do 40 dB,

- Umjerena naglušnost- osoba ne čuje zvuk razine od 40 dB do 60 dB (što već ulazi u govorni registar),
- Teška naglušnost- osoba ne čuje zvuk razine od 60 dB do 80 dB (ili, po nekim autorima, do 93 dB).

Prag sluha iznad 93 dB označava se kao gluhoća. Ona se, kao profesionalno oboljenje, očitava kao simetrično obostrano oštećenje.

Slikom 11 dat je, usporedbe radi, primjer audiograma zdrave i nagluhe osobe te pojedinca koji, u poznim godinama, već pati od staračke naglušnosti. Interesantno je promotriti liniju oštećenja sluha zbog buke paralelno se linijom staračke naglušnosti.



Slika 11. Primjer audiograma zdrave i nagluhe osobe [12]

U Republici Hrvatskoj oko 12. 000 osoba pati od oštećenja sluha, a podatak iz Hrvatskog saveza gluhih i nagluhih govori kako čak četvrtina te brojke, oko 3. 000 ljudi, otpada na Zagreb.

Istraživanje provedeno 1998. i 1999. godine na razini Republike Hrvatske, na uzorku od 12. 000 osoba starih od 16 do 20 godina, pokazalo je da 11 % njih posjeduje određenu formu oštećenja sluha što je izrazito zabrinjavajuće s obzirom na mladu dob ciljane ispitne

skupine. Unutar tih 11 %, više od 7 % ispitanika svoje oštećenje sluha ima zahvaliti posljedici akustičke traume, dok je u čak više od 90 % slučajeva oštećenje sluha nastalo kao posljedica urbanog života i okoliša (disko klubovi, glasno slušanje glazbe, pirotehnička sredstva i slično). Ipak, neznatan je broj ispitanika bio izložen i industrijskoj buci.

3. 4. SOCIJALNO- PRAVNI POGLED NA BUKU

U Republici Hrvatskoj problematika buke nalazi se u nadležnosti Ministarstva zdravstva, a temeljni propis za provedbu zaštite od buke jest Zakon o zaštiti od buke. Prema važećem hrvatskom Zakonu o zaštiti od buke, a kojim se ocjenjuju i kontroliraju razine buke okoliša kojoj su izloženi ljudi, pri čemu se odredbe ovog zakona ne odnose na, između ostalog, buku na radnome mjestu, buka štetna po zdravlje ljudi jest svaki zvuk koji prekoračuje propisane najviše dopuštene razine s obzirom na vrstu izvora buke, te mjesto i vrijeme njena nastanka. Mjerama zaštite od buke mora se spriječiti nastajanje emisije prekomjerne buke, odnosno smanjiti postojeća buka na dopuštene razine.

Zaštitu od buke obvezna su provoditi (i osigurati njeno provođenje) tijela državne uprave, jedinice lokalne uprave i područne (regionalne) samouprave te pravne i fizičke osobe koje obavljaju registrirane djelatnosti. Stručne poslove zaštite od buke mogu obavljati pravne osobe registrirane za obavljanje te djelatnosti koje imaju ovlaštenje ministra, a akreditirane su prema normi HRN EN ISO/ IEC 17025 uz prijelazni period za dobivanje akreditacije od dvije godine [13].

Kako bi zaštita od buke, sa zakonske strane, dobila na težini, propisane su i financijske represivne mjere kojim se odgovorne fizičke ili pravne osobe mogu teretiti u slučaju nepridržavanja odrednica zakona. Tako se, za različite (uz buku vezane) prekršaje, pravna osoba može kazniti novčanom kasnom u iznosu od 50. 000 kuna do 100. 000 kuna, odgovorna osoba u pravnoj osobi, ili fizička osoba, iznosom od 10. 000 kuna do 15. 000 kuna, grad novčanom kaznom od 50. 000 kuna do 80. 000 kuna, a odgovorna osoba u gradu iznosom od 5. 000 kuna do 10. 000 kuna. Također, sanitarni će inspektor, u slučaju postojanja prekršaja, novčanom kaznom od 1. 000 kuna na mjestu počinjenja prekršaja kazniti odgovornu osobu u pravnoj osobi ili fizičku osobu koja obavlja djelatnost za koju je potrebno provesti mjere zaštite od buke, a koje, usprkos zakonu, nisu provedene [13].

4. BUKA U INDUSTRIJI

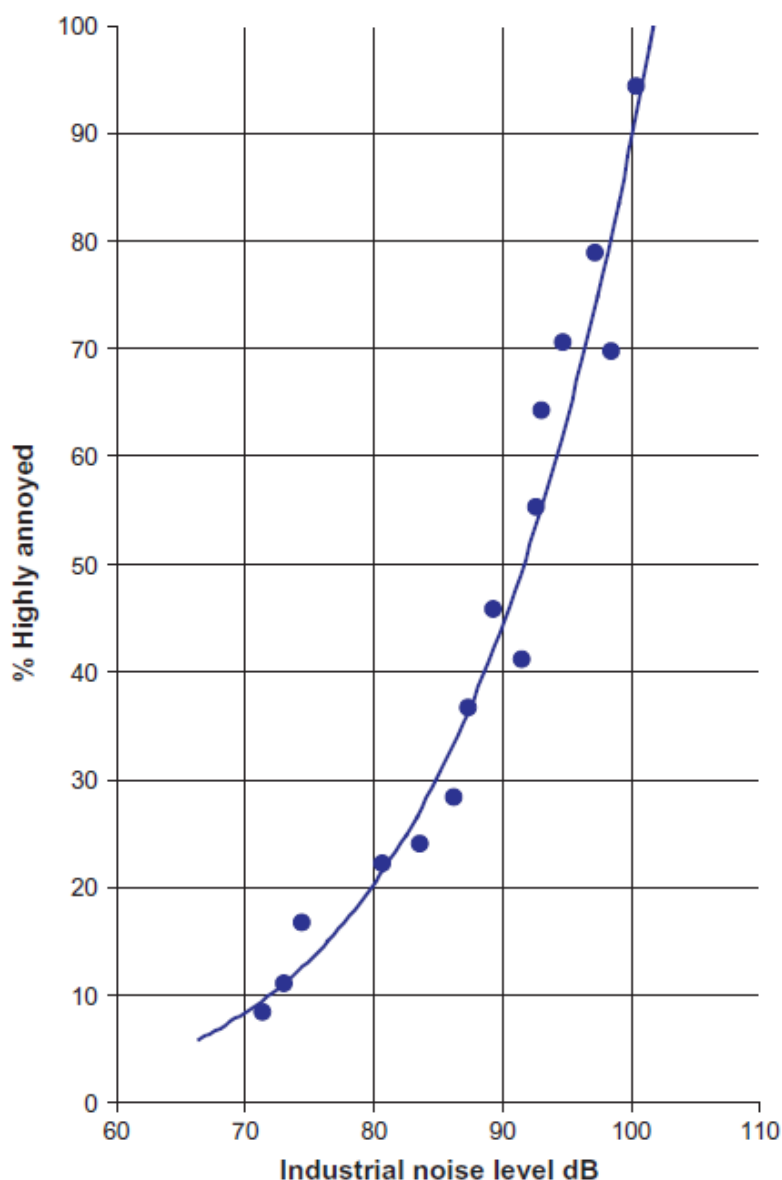
Problematici buke u industriji treba prići sa više strana. Kako je utjecaj buke različita karaktera (pa tako i pojavni industrijski oblici) na ljudsko tijelo (pa tako i ono industrijskoga radnika) već obrađeno, valja nam vidjeti kako ta ista buka utječe na rezultat rada radnika na kojeg ostavlja ovakvu ili onakvu posljedicu. Nakon toga, zanimljivo je pogledati kako zakon i njegove regulative svojim odredbama štite industrijskog radnika (gdje je naglasak, naravno, stavljen jedino i isključivo na zakonske okvire Republike Hrvatske). Tada se, konačno, može pristupiti sistematizaciji samih mehanizama zaštite od buke i principima mjerenja iste.

4. 1. UTJECAJ INDUSTRIJSKE BUKA NA RAD

Utjecaj buke različitih karaktera i osobina na ljudski organizam i njegovo funkcioniranje već je razrađen u prethodnim poglavljima ovoga rada. Ipak, kada čovjeka, kao funkcionalno biće, postavimo u kontekst (intelektualnog ili fizičkog) rada te kada je njegova djelatnost vezana uz obavljanje različitih zadataka koji sačinjavaju njegov posao, valja nam (uz, dakle, ranije spomenute psihofizičke konsekvence buke) prepoznati i neke druge posljedice koje buka ostavlja na čovjeka kao radnika i na rezultate njegove radne aktivnosti.

Istraživanja, naime, pokazuju kako buka, kao, za radnika, jedan apstraktan pojam, predstavlja povećé smetnje u izvršavanju zahtijevanih radnih zadataka. Takvo ometanje, jasno je, u situaciji industrijskog okruženja koje korist crpi iz, primjerice, preciznosti izvođenja radova ili snazi teške mašinerije, a uz rezultirajuću nepažnju ili rastresenost, može dovesti, a često i dovodi, do nastajanja različitih oblika štete, bilo po pojedinca (u vidu ugrožavanja njegove sigurnosti kao funkcije nepažljivog baratanja opremom), bilo po proizvodni proces ili finalni proizvod.

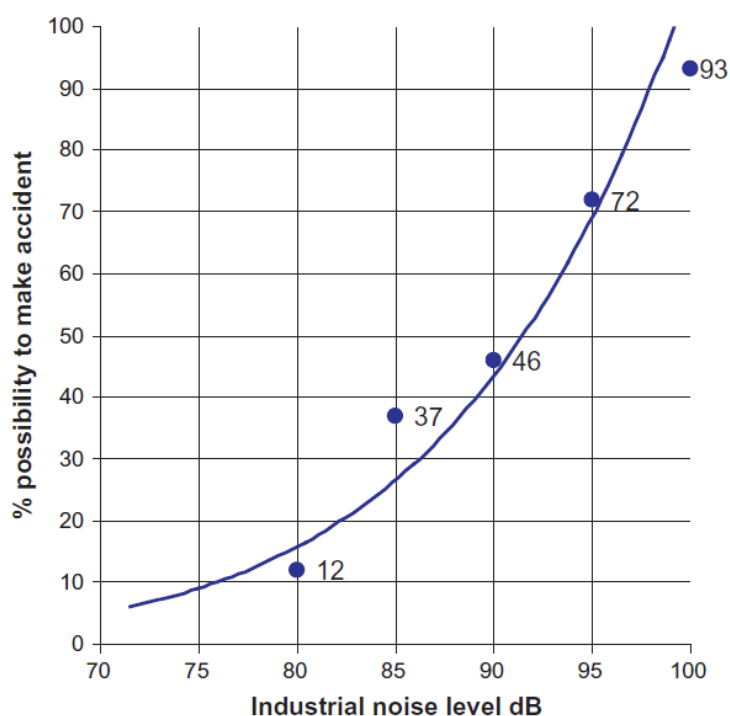
Nedavno je istraživanje, provedeno u Egiptu (unutar nekolicine industrijskih objekata, a na reprezentativnom uzorku), potvrdilo da razina industrijske buke snažno utječe, kako je i prikazano slikom 12, na osjećaj iritabilnosti zaposlenika.



Slika 12. Razine industrijske buke i postotak ispitanika koji su se osjećali izrazito razdraženo [14]

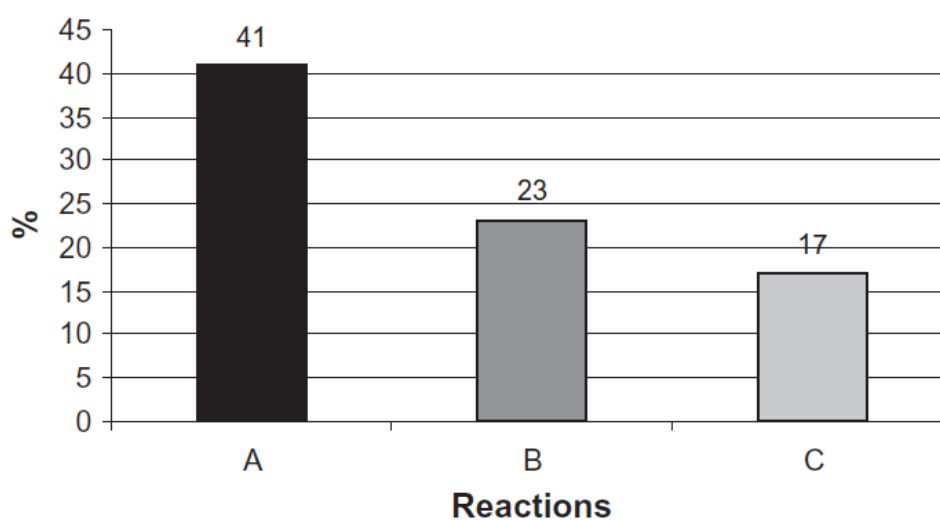
Sagledanu je razdraženost lako povezati sa mogućnošću da radnik, u takvim radnim uvjetima, napravi grešku i dovede se u opasnu situaciju (u kojoj bi njegovo zdravlje mogli biti, na ovaj ili onaj način, narušeno). U promatranom je uzorku, naime, 56, 7 % ispitanika izrazilo uvjerenje kako, uz povećanje razine industrijske buke, raste i vjerojatnost da će se dogoditi nezgoda na radu. Pri razini industrijske buke od 70 dB (A) do 75 dB (A) 12 % ispitanika potvrdilo je da bi, povećanjem razine buke, porasla i vjerojatnost nezgode na radu. Taj postotak raste na 37 % uz razine industrijske buke od 80 dB (A) do 85 dB (A), da bi, pri razinama buke od 95 dB (A) do 100 dB (A), dostigao vrijednost od 93 %. Slika 13 prikazuje

odnos između razine industrijske buke i vjerojatnosti da će ona dovesti do nezgode na radnome mjestu.



Slika 13. Odnos razina industrijske buke i vjerojatnosti da će doći do nezgode na radu [14]

Sa biheviorističkog je stajališta, radi poznavanja prirode radnika, zanimljivo vidjeti i koje bi bile njihove reakcije na prekomjernu industrijsku buku. Kako je prikazano slikom 14, njih 41 % bi se požalilo nadležnom tijelu, 23 % bi voljelo rad nastaviti na tišem mjestu, dok bi njih 17 % voljelo da je njihovo postrojenje zvučno izolirano [14].



Slika 14. Reakcije ispitanika na industrijsku buku [14]

Kako se ovdje radi o subjektivnom dojmu buke radnika, valja imati na umu kako buku radnog mjesta ne čine, nužno, samo izvori industrijske naravi. Izvor velikog zvučnog onečišćenja tako, primjerice, može biti i blizina frekventnih prometnica. Takve sadržaje, a u smislu možebitne protekcije radnika od izvora nepoželjne buke, valja diferencirati.

Također, kako ovdje, u biti, govorimo o buci kao rezultatu percepcije radnika, a ne o znanstvenoj činjenici, treba razumijevati da dojam buke, kao kompleksnog pojma, ne potječe nužno samo od njegove zvučne komponente. Radnikova (ili, općenito, čovjekova) će percepcija (pa i ocjena) buke (no i bilo kakvog fizičkog okruženja) biti rezultat kompleksnog procesa te će ovisiti o, primjerice, očekivanjima, osobnim iskustvima ili informacijama koje on posjeduje o izvoru buke.

Tako će percipirana razina buke, pa i prateća iritabilnost, biti manja ako se buka javlja u trenucima kada je očekujemo. U konkretnome radnome okruženju, istraživanja su pokazala kako radnici buku bolje podnose za vrijeme dana, nego li za vrijeme noći.

Isto tako, postoji snažna korelacija između razine iritiranosti bukom koju ispitanik osjeća i stanovitog straha (ovog ili onog porijekla, a najčešće zbog pukog neznanja) od industrijskog postrojenja; čim je strah veći, veća je i razina razdraženosti (promatrano u uvjetima jednake razine buke). S druge pak strane, ako ispitanik (radnik) tvornicu vidi beneficijalnom za, primjerice, njegov osoban ili lokalni ekonomski rast, bolje će podnositi buku.

Na percepciju industrijske buke utjecat će i vidljivost njena izvora. U slučaju da radnik izvor buke može vidjeti, korespondirajuća će razdraženost biti veća.

Zanimljivo je i primijetiti kako demografska obilježja ne utječu znatno na sposobnost podnošenja buke (a pogotovo kada ih usporedimo sa nekim drugim, prethodno navedenim, čimbenicima). Ipak, pokazalo se kako industrijsku buku žene nešto teže podnose nego li muškarci.

Zbog heterogene naravi industrijske buke, njena se ispitivanja najčešće bave konkretnim i specifičnim postrojenjima ili procesima izrade. Usporedbom dobivenih rezultata takvih istraživanja daje se zaključiti kako jednake razine buke, a iz različitih izvora i

u različitim radnim okruženjima, te, svakako, različitog karaktera, u radnika pobuđuje različit osjećaj nadraženosti [15].

4. 2. ZAKON U SLUŽBI ZAŠTITE RADNIKA OD INDUSTRIJSKE BUKE

Hrvatski Zakon o zaštiti na radu se, u svojim općim odredbama, orijentira na sprečavanje ozljeda na radu, profesionalnih bolesti i drugih bolesti u svezi s radom te na zaštitu radnog okoliša. Osobita zaštita propisuje se radi očuvanja nesmetanog duševnog i tjelesnog razvitka mladeži, zaštite žena od rizika koji bi mogli ugroziti ostvarivanje materinstva, zaštite invalida i profesionalno oboljelih osoba od daljnjeg oštećenja zdravlja i umanjenja njihove radne sposobnosti te radi očuvanja radne sposobnosti starijih zaposlenika u granicama primjerenim njihovoj životnoj dobi.

Prema Članku 9. ovoga zakona, osnovna pravila zaštite na radu sadrže zahtjeve kojima sredstvo rada mora udovoljiti kada je u upotrebi, a naročito, između ostalog, po pitanju ograničenja buke i vibracija u radnome okolišu. Također, poslodavac je, prema Članku 50. ovoga zakona, dužan obavljati ispitivanja u radnim prostorijama u kojima, između ostalih radnih uvjeta, u procesu rada nastaju buka i vibracije [16].

Zakon o zaštiti od buke i Zakon o zaštiti na radu, iako spominju buku, ni u kojoj eksplicitnoj formi ne propisuju konkretne razine buke, pa tako ni regulativne mjere, kojima bi radnik u industriji smio biti izložen, a bez pojave štetnih učinaka za njegovo zdravlje. Spomenuto je, naime, u domeni Pravilnika o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu.

Tim se pravilnikom utvrđuju minimalni zahtjevi zaštite radnika od rizika po njihovo zdravlje i sigurnost koji prolaze ili mogu proizaći od izloženosti buci, a posebno rizika po sluh.

U smislu ovog pravilnika, fizički parametri koji se koriste kao faktori prognoze rizika definiraju se na sljedeći način:

- a) Vršna vrijednost zvučnoga tlaka (P_{peak}): najviša vrijednost frekvencijski „C“–vrednovanog trenutnog zvučnog tlaka,
- b) Dnevna razina izloženosti buci ($LEX, 8h$) (dB (A) re. 20 μ Pa): vremenski vrednovana srednja razina izloženosti buci za nominalni osmosatni radni dan kako je to definirano međunarodnom normom ISO 1999: 1990, točka 3. 6. i HRN ISO 9612: Akustika–

Smjernice za mjerenje i utvrđivanje izloženosti buci u radnoj okolini. Obuhvaća svu buku prisutnu na radu, uključujući i impulsnu buku.,

- c) Tjedna razina izloženosti buci ($L_{EX, 8h}$): vremenski vrednovani prosjek dnevnih razina izloženosti buci za nominalni tjedan od pet osmosatnih radnih dana kako je to definirano međunarodnom normom ISO 1999: 1990, točka 3. 6. (napomena 2.) i HRN ISO 9612: Akustika– Smjernice za mjerenje i utvrđivanje izloženosti buci u radnoj okolini.

Ovaj pravilnik propisuje sljedeće granične vrijednosti izloženosti i upozoravajuće vrijednosti izloženosti tijekom osmosatnog radnog dana te sljedeće razine vršnih vrijednosti zvučnoga tlaka:

- a) Granična vrijednost izloženosti: $L_{EX, 8h} = 87$ dB (A) i $p(peak) = 200$ Pa (140 dB (C) u odnosu na referentni zvučni tlak 20 μ Pa),
- b) Gornja upozoravajuća granica izloženosti: $L_{EX, 8h} = 85$ dB (A) i $p(peak) = 140$ Pa (137 dB (C) u odnosu na referentni zvučni tlak 20 μ Pa),
- c) Donja upozoravajuća granica izloženosti: $L_{EX, 8h} = 80$ dB (A) i $p(peak) = 112$ Pa (135 dB (C) u odnosu na referentni zvučni tlak 20 μ Pa).

Za granične vrijednosti izloženosti vrijedi da poslodavac pri utvrđivanju stvarne izloženosti radnika mora uzeti u obzir smanjenje buke zbog uporabe osobne zaštitne opreme za zaštitu sluha, dok za upozoravajuće vrijednosti izloženosti vrijedi da taj učinak ne smije uzimati u obzir.

Zahtjeve za bukom neometan rad treba, pravilnik kaže, imati u vidu već prilikom planiranja proizvodnog ili radnog procesa, a, ako se utvrdi da je rad ometan bukom, poslodavac mora proučiti mogućnosti za smanjenje smetnji i/ ili skrbiti da toj buci bude izložen što manji broj radnika.

Pravilnik utvrđuje i neke mjere za smanjenje rizika koji proizlaze iz izloženosti buci. Predlažu se, tako, primjerice, druge metode rada koje iziskuju manju izloženost buci, odabir odgovarajuće radne opreme s obzirom na posao koji treba obaviti, a koja emitira najmanju moguću buku, projektiranje i planiranje radnih mjesta i radilišta, odgovarajuće informiranje i osposobljavanje kojim će se uputiti radnike u korištenje radne opreme na ispravan način

kako bi se njihova izloženost buci smanjila na najmanju moguću razinu te smanjenje buke primjenom osnovnih pravila zaštite na radu (primjerice, smanjenje zračne komponente buke zaslonima te smanjenje strukturne komponente buke prigušenjem ili izolacijom).

Ako je rizike koji proizlaze iz izloženosti buci nemoguće spriječiti primjenom osnovnih pravila zaštite na radu, odnosno odgovarajućim organizacijskim mjerama, radnicima treba na raspolaganje staviti odgovarajuću i dobro prilagođenu osobnu opremu za zaštitu sluha. U tu se svrhu preporučaju:

- Ušni štitnici (prema normi HRN EN 352- 1. dio) koje radnik nosi preko ušiju, a pričvršćuje ih direktno na kacigu ili posebnim držačem (preko glave, ispod brade, na zatiljku). Ovisno o materijalu i izvedbi, ušnim štitnicima moguće je prigušiti buku u rasponu od 21 dB do 36 dB (SNR) kao i u različitim kombinacijama HML frekvencijskih vrijednosti. Uporaba ušnih štitnika preporuča se na poslovima pri kojima se prekomjerna buka javlja povremeno, kratkotrajno, odnosno pri kratkotrajnom zadržavanju u području djelovanja buke, ako radnik ne može primijeniti ušne čepove za zaštitu sluha zbog preuskih ušnih kanala, ako kod radnika postoji sklonost upali slušnih kanala ili se primijeti tjelesna reakcija nepodnošljivosti uporabe ušnih čepova te na poslovima pri kojima se javlja impulsna buka, na kojima je, uz zaštitu sluha, potrebno istodobno osigurati prepoznavanje upozoravajućih zvučnih signala i na kojima je potrebna mogućnost komunikacije (posebne izvedbe elektronskih ušnih štitnika i štitnika s UKW radio vezom.,
- Ušni čepovi (prema normi HR EN 352- 2. dio) koje radnik stavlja u ušni kanal ili ušnu šuplinu, a izrađuju se od specijalne zaštitne vate ili umjetnih materijala (poliuretanska pjena ili silikon). Mogu biti za jednokratnu ili višekratnu uporabu, formabilni ili prethodno formirani, a koriste se odvojeno te povezani trakom ili čvrstim držačem koji se namješta ispod brade ili na zatiljku. Ovisno o materijalu i vrsti izvedbe, mogu prigušiti buku u rasponu od 23 dB do 37 dB (SNR). Uporaba ušnih čepova za zaštitu sluha preporuča se ako nema posebnih razloga za uporabu ušnih štitnika, na poslovima pri kojima postoji trajna izloženost djelovanju buke, pri pojavi jačeg znojenja korisnika ušnih štitnika te kao sredstvo za dodatno prigušenje buke pri korištenju ušnih štitnika.,

- Otoplastika koja se izrađuje prema individualnim mjerama korisnika i nosi se u ušnom kanalu.

Gore navedena osobna oprema za zaštitu sluha bira se na način da se rizici po sluh uklone ili smanje na najmanju moguću razinu pri čemu je poslodavac dužan omogućiti predstavnicima radnika da, od ponuđenih osobnih zaštitnih sredstava koja odgovaraju tehničkim zahtjevima, nakon probnog korištenja, predlože ono koje im najbolje odgovara. Kada izloženost buci prelazi donju upozoravajuću granicu izloženosti, poslodavac osobnu opremu za zaštitu sluha radnicima tek stavlja na raspolaganje, uz preporuku da je upotrebljavaju. S druge strane, kada je izloženost buci jednaka ili viša od gornje upozoravajuće granice izloženosti, poslodavac radnicima mora osigurati odgovarajuću osobnu opremu za zaštitu sluha.

Pravilnik predviđa i zdravstveni nadzor radnika kada procjene i mjerenja unutar radne okoline pokažu da postoji rizik za njihovo zdravlje. Ako se kontrolom slušne funkcije utvrdi da radnik ima oštećenje sluha, specijalist medicine rada utvrđuje je li oštećenje rezultat izloženosti buci na poslu. U slučaju da tome jest tako, specijalist medicine rada obavještava radnika o rezultatima koji se odnose na njega osobno, dok je poslodavac primoran revidirati procjenu rizika i mjere predviđene za uklanjanje ili smanjenje rizika gdje, naravno, specijalist medicine rada igra bitnu koordinatorsku ulogu. U ovome se nesretnome slučaju, također, organizira i sistematski zdravstveni nadzor te se osigurava revidiranje zdravstvenog stanja ostalih radnika raspoređenih na poslove s posebnim uvjetima rada zbog izloženosti buci, koji su bili izloženi na sličan način [17].

Dopuštene razine buke s obzirom na vrstu djelatnosti date su tablicom 3.

Tablica 3. Dopusštene razine buke s obzirom na vrstu djelatnosti [17]

Redni broj	Opis posla	Najviša dopuštena razina buke $L_{A,eq}$ u dB (A)	
		Razina buke na radnome mjestu koja potječe od proizvodnih izvora	Razina buke na radnome mjestu koja potječe od neproizvodnih izvora (ventilacija, klimatizacija, promet i dr.)
1	<i>Najzahtjevniji umni rad, vrlo velika usredotočenost, rad vezan za veliku odgovornost, najsloženiji poslovi upravljanja i rukovođenja</i>	45	40
2	<i>Pretežno umni rad koji zahtijeva usredotočenost, kreativno razmišljanje, dugoročne odluke, istraživanje, projektiranje, komuniciranje sa skupinom ljudi</i>	50	40
3	<i>Zahtjevniji uredski poslovi, liječničke ordinacije, dvorane za sastanke, školska nastava, neposredno govorno i/ ili telefonsko komuniciranje</i>	55	45
4	<i>Manje zahtjevni uredski poslovi, pretežno rutinski umni rad koji zahtijeva usredotočenje ili neposredno govorno i/ ili telefonsko komuniciranje, komunikacijske centrale</i>	60	50
5	<i>Manje zahtjevni i uglavnom mehanizirani uredski poslovi, prodaja, vrlo zahtjevno upravljanje sustavima, fizički rad koji zahtijeva veliku pozornost i usredotočenost, zahtjevni poslovi montaže</i>	65	55
6	<i>Pretežno mehanizirani uredski poslovi, zahtjevno upravljanje sustavima, upravljačke kabine, fizički rad koji zahtijeva stalnu usredotočenost, rad koji zahtijeva nadzor sluhom, rad koji se obavlja na temelju zvučnih signala</i>	70	60
7	<i>Manje zahtjevni fizički poslovi koji zahtijevaju usredotočenost i oprez, manje zahtjevno upravljanje sustavima</i>	75	65
8	<i>Pretežno rutinski fizički rad sa zahtjevom na točnost, praćenje okoline slušanjem</i>	80	65

4. 3. MEHANIZMI ZAŠTITE OD BUKE U INDUSTRIJI

Principi mehanizama zaštite od (industrijske) buke kompleksne su i opsežne naravi. Iz tog im razloga valja prići oprezno i polako, postavivši, prvo, neke polazišne postavke. Tek se

nakon toga može pristupiti pravilnom proučavanju samih principa zaštite od buke u industriji i odabiru odgovarajućih materijala.

4. 3. 1. POLAZIŠNE POSTAVKE

Iako su generalni principi inženjerstva zaštite od industrijske buke dobro postavljene, rezultate tehnika smanjenja buke nije uvijek moguće egzaktno predvidjeti. Usprkos tome, metode rješavanja konkretnog zvukovnog problema, u svojoj srži, nude postupke kroza koje se sam problem može jasnije definirati, što omogućava eventualno donošenje adekvatnog rješenja.

Svaki se problem zaštite od buke može razbiti na tri sastavne komponente:

1. Izvor emitiranja zvučne energije,
2. Put kojim zvučna energija putuje,
3. Prijemnik (ili, u nedostatku bolje riječi, a kako se ovdje radi o živome biću, slušač).

Nakon ove početne komponentne diferencijacije, važno se podsjetiti da cilj zaštite od industrijske buke nije smanjenje razine buke zbog same sebe, već zbog dobrobiti prijemnika, ljudskoga uha. Unutar toga konteksta, mehanizmi zaštite od buke moraju biti efikasni, no, u isto vrijeme, i ekonomski prihvatljivi. S obzirom na spomenuto, te na navedene tri glavne komponente problema zaštite od buke, možemo ustvrditi kako će rješenje problema morati uključivati:

1. Smanjenje zvučne energije koju odašilje izvor,
2. Odvrćanje ili redukciju zvučne energije duž puta kojim prolazi,
3. Zaštitu prijemnika [18].

4. 3. 2. PRINCIPI ZAŠTITE OD BUKE U INDUSTRIJI

Postoje, generalno, četiri osnovna principa kojima se industrijska buka drži pod kontrolom: izolacija, apsorpcija, izolacija vibracija i prigušenje vibracija. Niti jedan od tih principa nije, sam po sebi, superioran drugima, već će njihova uspješnost zavisiti od njihova ispravnog razumijevanja [18].

4. 3. 2. 1. IZOLACIJA

Jednostavno rečeno, izolacija je fizičko odvajanje glasne opreme od ostale opreme ili područja. Ta će separacija smanjiti zbirnu buku koja nastaje postavljanjem nekoliko bučnih strojeva u dati prostor. Jedan su vid primjene izolacije i pregrade sačinjene od materijala visoke sposobnosti (zvučne) apsorpcije sa (zvučno) nepropusnim zidovima.

Zvučno izolacijska svojstva materijala dana su terminom transmisijskih gubitaka (eng. *transmission loss, TL*). Transmisijski je gubitak u funkciji odnosa energije koja je ostala vezana na materijalu kroza koji je pokušala proći i energije koja je kroz materijal i prošla. Navedeno se može prikazati jednadžbom (8).

$$TL = 10 \log \frac{\text{energija ostala vezana na materijalu}}{\text{energija prošla kroz materijal}} \quad (8)$$

Tablicom 4 date su *TL* vrijednosti za često korištene materijale.

Tablica 4. Transmisijski gubitak zvuka kroz često korištene materijale [18]

Materijal	Transmisijski gubitak, <i>TL</i> (dB)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Iverica (debljine 16 mm)	14	20	25	27	24	25
Čelična ploča (debljine 1, 5 mm)	19	21	27	27	32	39
Čelični lim (debljine 0, 9 mm)	17	20	24	27	32	37
Čelični lim (debljine 0, 6 mm)	15	19	22	26	31	34
Betonski blok (debljine 203 mm, šuplji)	33	35	42	46	51	52
Betonski blok (debljine 203 mm, puni)	36	40	45	48	55	55
Knauf (gipsana zidna ploča, debljine 16 mm)	19	22	28	31	26	28

Jasno je da *TL* podatak, sam za sebe, bez dovođenja u relaciju sa nekim referentnim vrijednostima, nije od prevelike koristi te se, stoga, primjenjuje standardizirani jednoznaменkasti sustav ocjenjivanja, kakav su prihvatili i proizvođači *TL* materijala. Taj se ocjenjivački sustav naziva Razred zvučne transmisije (eng. Sound Transmission Class, *STC*) gdje veća *STC* vrijednost ukazuje na efikasniju zvučnu barijeru. Tablicom 5 date su *STC* veličine za pojedine česte građevne materijale [18].

Tablica 5. *STC* za pojedine česte građevne materijale [18]

Materijal	<i>STC</i>
Iverica (debljine 8 mm)	25
Čelik (debljine 0,6 mm)	26
Gipsana ploča (debljine 13 mm)	26
Gipsana ploča (debljine 16 mm)	28
Olovni vinil (debljine 1,6 mm)	29
Staklena ploča (debljine 3 mm)	28
Staklena ploča (debljine 6 mm)	30
Čelična ploča (debljine 5 mm)	35
Drvena ploča (debljine 25 mm)	36
Betonski blok (debljine 102 mm, punjen pijeskom)	43
Dvije gipsane ploče (svaka debljine 16 mm)	43
Betonski blok (šuplji, debljine 203 mm)	46
Betonski blok (šuplja jezgra, debljine 203 mm)	50
Cigleni zid (debljine 102 mm) sa žbukom (debljine 13 mm)	50
Cigleni zid (debljine 203 mm)	52
Beton (debljine 152 mm)	54
Cigleni zid (debljine 305 mm)	59

4. 3. 2. 2. APSORPCIJA

Apsorpcija se, u određenome obimu, zbiva u svih materijala. Do zvučne apsorpcije dolazi kada zvučni val uđe u materijal, a dio se energije pretvori u toplinu. U tu se svrhu, uobičajeno, koriste vlaknasti, laki te porozni materijali, a ističu se akustični strop, stakloplastika, mrežaste pjene ili filc.

Koeficijent apsorpcije α materijala govori nam u kojoj će mjeri, unutar nekog materijala, doći do zvučne apsorpcije, gdje vrijednost od 1, 00 znači potpunu apsorpciju. Tablicom 6 dati su koeficijenti apsorpcije zvuka za česte akustičke materijale, a tablicom 7 koeficijenti apsorpcije zvuka za česte građevne materijale.

Tablica 6. Koeficijenti apsorpcije zvuka α za česte akustičke materijale [18]

Materijal	Frekvencija, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Vlaknasto staklo</i>						
<i>Debljine 25 mm</i>	0, 07	0, 23	0, 48	0, 83	0, 88	0, 80
<i>Debljine 51 mm</i>	0, 20	0, 55	0, 89	0, 97	0, 83	0, 79
<i>Debljine 102 mm</i>	0, 39	0, 91	0, 99	0, 97	0, 94	0, 89
<i>Poliuretanska pjena</i>						
<i>Debljine 6 mm</i>	0, 05	0, 07	0, 10	0, 20	0, 45	0, 81
<i>Debljine 13 mm</i>	0, 05	0, 12	0, 25	0, 57	0, 89	0, 98
<i>Debljine 25 mm</i>	0, 14	0, 30	0, 63	0, 91	0, 98	0, 91
<i>Debljine 51 mm</i>	0, 35	0, 51	0, 82	0, 98	0, 97	0, 95
<i>Filc</i>						
<i>Debljine 13 mm</i>	0, 05	0, 07	0, 29	0, 63	0, 83	0, 87
<i>Debljine 25 mm</i>	0, 06	0, 31	0, 80	0, 88	0, 87	0, 87

Tablica 7. Koeficijenti apsorpcije zvuka α za česte građevne materijale [18]

Materijal	Frekvencija, Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Cigla</i>	0, 03	0, 03	0, 03	0, 04	0, 05	0, 07
<i>Cigla (obojena)</i>	0, 01	0, 01	0, 02	0, 02	0, 02	0, 03
<i>Betonski blok</i>	0, 36	0, 44	0, 31	0, 29	0, 39	0, 25
<i>Betonski blok (obojen)</i>	0, 10	0, 05	0, 06	0, 07	0, 09	0, 08
<i>Beton</i>	0, 01	0, 01	0, 015	0, 02	0, 02	0, 02
<i>Staklo (obično prozorsko)</i>	0, 35	0, 25	0, 18	0, 12	0, 07	0, 04
<i>Žbuka</i>	0, 013	0, 015	0, 02	0, 03	0, 04	0, 05
<i>Iverica</i>	0, 28	0, 22	0, 17	0, 09	0, 10	0, 11
<i>Stakloplastika (debljine 51 mm)</i>	0, 20	0, 55	0, 89	0, 97	0, 83	0, 79

Uspješnost materijala u apsorpciji zvuka se nerijetko izražava i sabinima. Odnos sabina i koeficijenta apsorpcije zvuka dat je jednadžbom (9), gdje je α koeficijent apsorpcije zvuka, a A veličina površine apsorpcijskog materijala u m^2 .

$$sabini = \alpha \cdot A \quad (9)$$

Boljeg shvaćanja radi, kada bi smo u jednakost (9) uvrstili 1 m^2 materijala apsorpcijskog koeficijenta 0, 60, tada će uspješnost zvučne apsorpcije promatranog materijala iznositi 0, 60 m^2 sabina. To bi značilo da će materijal apsorbirati 60 % zvučne energije vala, dok će 40 % energije biti reflektirano.

Sumiranjem individualnih umnožaka veličine područja i koeficijenta apsorpcije za sve površine unutar prostorije, možemo razviti mjeru akustičkog okruženja prostorije koju opisuje termin konstante prostorije (eng. *room constant, R*). Izraz za navedenu konstantu dat

je jednadžbom (10), gdje je α_n koeficijent apsorpcije zvuka, A_n veličina površine apsorpcijskog materijala, a R konstanta prostorije u m^2 sabinima.

$$R = \alpha_1 \cdot A_1 + \alpha_2 \cdot A_2 + \dots + \alpha_n \cdot A_n \quad (10)$$

Što je veća konstanta prostorije, to je veća i njena sposobnost da, pri danoj frekvenciji, apsorbira zvuk. Valja primijetiti kako R raste sa veličinom prostorije [18].

4.3.2.3. IZOLACIJA VIBRACIJA

Kako zrakom nošen zvuk može uzrokovati bilo koja vibrirajuća površina, kontrola vibracija u službi zaštite od buke bavi se izvorom zvuka. Pojednostavljeno, izolacija vibracija cilja na odvajanje vibrirajućeg člana od njegova energetskeg izvora. Ovaj oblik kontrole može uključivati čak i rekonstrukciju stroja ili unapređenje sustava održavanja kako bi se, primjerice, eliminirao disbalans ili kontakt između pokretnog i statičnog dijela.

Izolacija o kojoj ovdje pričamo uobičajeno uključuje separaciju vibrirajućeg dijela od izvora energije pomoću stlačivo- elastičnih materijala. U tu se svrhu često koriste pluto, neopren, filc, staklena vlakna, elastomeri ili čelične opruge. Materijal se bira ovisno o težini dijela kojeg treba poduprijeti, potrebnom otklonu i najnižoj frekvenciji vibriranja dijela.

Primarna je funkcija vibracijskog izolatora limitirati prenosivost vibracijske energije. Odnos najniže frekvencije vibriranja f i prirodne rezonantne frekvencije izolatora f_n pod teretom daje nam mjeru učinkovitosti promatranog izolatora, kako je i objašnjeno tablicom 8.

Tablica 8. Ponašanje izolatora ovisno o odnosu f/f_n [18]

f/f_n	Objašnjenje
1	Izolator se ponaša kao pojačalo
2	Izolator se počinje ponašati kao pojačalo
> 2	Izolator obavlja svoju ulogu

Opće je pravilo da se stroj, postavljen na teškim i krutim temeljima, smatra dobro izoliranim kada njegova rezonantna frekvencija iznosi $1/5$ najniže vibracijske frekvencije, čime je $f/f_n = 5$ [18].

4. 3. 2. 4. PRIGUŠENJE VIBRACIJA

Prigušujući materijali služe za apsorpciju zvuka koji putuje krutinama. Materijal upija vibracije i pretvara ih u toplinsku energiju, čime smanjuje rezonacijski efekt.

Uobičajeno je da se vibrirajuće površine podvrgavaju prigušenju vibracija kao kontrolnoj mjeri. Vibracije se prigušuju i kod udarne buke (primjerice, kada obrađivani kruti materijal udara o stjenke spremnika). Korištenjem viskoelastičnih prigušujućih spojeva, može se postići smanjenje buke za 10 dB (A) do 15 dB (A).

Praksa govori kako bi debljina prigušujućeg materijala trebala biti minimalno jednaka debljini aluminija i barem duplo deblja od debljine čelika, ovisno o tome koji od ova dva materijala koristimo (uz napomenu da su baš oni, dakako, izdvojeni zbog česte upotrebe u strojarској struci). Prigušenje se često postiže strukturnim skrućivanjem. Koriste se materijali koji se mogu nanijeti lijepljenjem, bojenjem ili raspršivanjem [18].

4. 3. 3. ODABIR ODGOVARAJUĆEG MATERIJALA

Odabir odgovarajućeg materijala kojeg ćemo koristiti kako bi smo doskočili problemu zaštite od industrijske buke nikako se ne može svesti na puki izračun optimalnih svojstava prigušenja zvuka. Na izbor, naime, utjecaj imaju i okolišni te regulatorni čimbenici.

Okolišni čimbenici mogu biti:

- Izloženost,
- Vlaga,
- Otapala,
- Vibracije,
- Prljavština,
- Ulja i maziva,
- Temperatura,

- Korozivni materijali.

Regulatorni utjecaj mogu imati:

- Ograničenja u svezi korištenja olova u prostorijama s hranom ili lijekovima,
- Ograničenost pri odabiru materijala zbog potencijalnog kontakta sa prehrambenim proizvodima ili lijekovima,
- Zahtjevi na dezinfekciju ili čišćenje,
- Protupožarne mjere,
- Eliminacija područja ne kojima se mogu kriti štetočine,
- Ograničenja zbog prosipanja vlakana,
- Mogućnosti temeljenja teških strojeva,
- Oprema za nadzor [18].

Tablicom 9 dana su svojstva materijala koji se nerijetko koriste kod zaštite od industrijske buke, a s obzirom na pojedine okolišne i regulatorne čimbenike.

Tablica 9. Svojstva pojedinih čestih materijala s obzirom na okolišne i regulatorne čimbenike [18]

	Pjene	Stakloplastika	Krute pločice
Zapaljivost	Mogu biti proizvedene samogaseće, ali nisu, generalno, primjerene za arhitektonske svrhe.	Dobra otpornost na požare.	Dobra otpornost na požare.
Akustička svojstva	Izvrсна apsorpcijska svojstva u području srednjih do visokih frekvencija.	Izvrсна apsorpcijska svojstva u području srednjih do visokih frekvencija.	Dobra apsorpcijska svojstva u području srednjih do visokih frekvencija.
Utjecaj na okoliš	Neotrovne, otporne na vibracije, propadaju pri visokim temperaturama.	Zagađenje vlaknima može biti opasno. Loša otpornost na vibracije. Dobro podnose visoke temperature.	Bezopasne. Dobra svojstva pri visokim temperaturama. Dobra vibracijska svojstva.
Osjetljivost na akustičku degradaciju	Mala osjetljivost ako su obložene i zapečaćene na rubovima	Mala osjetljivost ako je obložena i zapečaćena na rubovima	Loša u štetnom okruženju.
Glavna primjena	Pregrade za strojeve, podne i zidne obloge.	Pregrade za strojeve. Visoko temperaturno okruženje.	Arhitektura.

U tablici 10 dat je pregled tipičnih materijala za kontrolu buke i vibracija.

Tablica 10. Pregled tipičnih materijala u kontroli buke i vibracija [18]

Apsorpcija buke	Zvučna pregrada	Prigušenje vibracija	Izolacija vibracija
<ul style="list-style-type: none"> • Zavjesna fasada • Filc i tkanine • Medijapan ploča • Staklena vuna i vlakna • Mineralna vuna • Perforirane keramičke pločice • Perforirani metalni lim • Porozni metali • Raspršujući premazi • Drvena vlakna 	<ul style="list-style-type: none"> • Pjenasti kompoziti s plastikom • Gipsane ploče • Olovne ploče • Opterećene plastične ploče • Opterećene gumene ploče • Iverica • Brtvila i pečatne trake • Plastična pjena 	<ul style="list-style-type: none"> • Adhezivi • Elastomeri • Polutekući spojevi • Plastična baza • Ljepenke 	<ul style="list-style-type: none"> • Elastomeri • Pjene • Obloge • Vlakna • Ploče • Deke • Fleksibilni cijevni spojevi • Fleksibilne spojke vratila • Postolje stroja • Sustav lebdećeg poda • Prigušivači vibracija • Izolatori vibracija

4. 4. MJERENJE BUKE U INDUSTRIJI

Industrijska se buka može mjeriti na razne načine. Kako bi se polje tolike širine barem okvirno moglo prikazati, redom će biti dani standardi za mjerenje buke, utjecaji koji, u industrijskom okruženju, mogu utjecati na snimljeni spektar te osnovni principi instrumenata za mjerenje buke (uz usputni pogled na pokoji realni primjer).

4. 4. 1. STANDARDI ZA MJERENJE BUKE

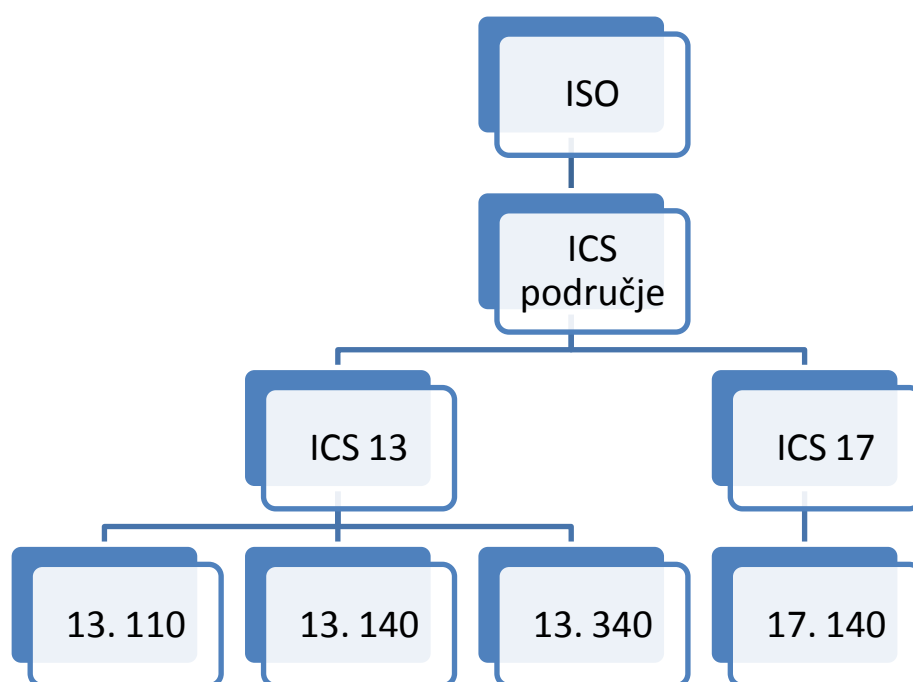
Kako bi dobiveni rezultati mjerenja buke bili relevantni, mjerni instrumenti i metode moraju biti u skladu sa određenim standardima. Ti standardi propisuju:

- Karakteristike mjernih instrumenata,
- Mjerne metode za mjerenje buke različitih vrsta strojeva,
- Mjerne metode koje definiraju utjecaj buke na čovjeka,
- Metode procjene buke i štetnih efekata.

Najvažniji standardi unutar područja mjerenja buke obuhvaćeni su standardima:

- IEC (eng. International Electrotechnical Commission),
- ISO (eng. International Organization for Standardization).

Valja razumijevati kako je ovdje IEC nadležan u području konstrukcije instrumenata, a ISO u području mjerne tehnike, eksperimentalnih uvjeta, mjernih parametara (i njihovih granica) te rezultata mjerenja. Međunarodna klasifikacija standarda u području buke shematski je dana slikom 15 [19].



Slika 15. Međunarodna klasifikacija standarda u području buke [19]

ICS 13 bavi se okolišem, zdravstvenom zaštitom i sigurnošću (eng. Environment. Health protection. Safety.). Unutar njega se, između ostalog, nalaze grupe 13. 110, koja se odnosi na sigurnost strojeva (eng. Safety of machinery), 13. 140, koja se bavi utjecajem buke na ljude (eng. Noise with respect to human beings), te 13. 340, koja se bavi zaštitnom opremom (eng. Protective equipment).

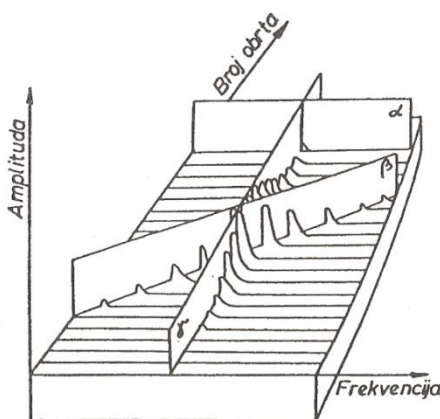
ICS 17 bavi se metrologijom, mjerenjima te prirodnim pojavama (eng. Metrology and measurement. Physical phenomena.). Unutar njega se, pored ostalih, nalazi i 17. 140, koji se bavi akustikom i akustičnim mjerenjima (eng. Acoustics and acoustic measurements) [20].

4. 4. 2. UTJECAJI NA MJERENJE BUKE

Postupak mjerenja buke različitih industrijskih strojeva i uređaja odnosi se na definiranje frekvencija koje dolaze od određenog zvučnog izvora, a mjeri se ukupna razina zvuka i spektar frekvencija. Na snimljeni spektar najviše utječu:

- Tehnološke nesavršenosti rotirajućih elemenata, od čega buku najviše proizvode ležajevi, rotori, zupčanci, kola turbine i slične pozicije,
- Postojanje prinudne sile sa pobudnom frekvencijom koja je jednaka ili bliska nekoj od frekvencija stroja (noseća struktura, poklopci, vratila, zupčanci i slično).

Kako je i prikazano Campbellovim trodimenzionalnim dijagramom na slici 16, sa promjenom broja okretaja u spektru po frekvencijskoj osi pomiču se vrhovi koji odgovaraju rotirajućim pobudama, a vrhovi koji odgovaraju vlastitim frekvencijama mijenjaju se po veličini [19].



Slika 16. Campbellov trodimenzionalni dijagram [19]

4. 4. 3. INSTRUMENTI ZA MJERENJE BUKE

Instrumenti za mjerenje buke pretvaraju zvuk u neki drugi vid energije. Zvuk se, pomoću mikrofona i pretvarača, detektira i pretvara u električni signal. Najčešće se koriste instrumenti za mjerenje buke koji rade sa ugrađenim:

- Elektrostatičkim,
- Elektrodinamičkim,
- Piezoelektričnim,
- Magnetostrikcijskim pretvaračem.

Različiti instrumenti mjerenja buke imaju mogućnost statičke ili frekventne analize primljenog signala, a mogu, nadalje, vršiti računanje izmjerenih vrijednosti u željeni oblik ili odgovarajuće jedinice, ovisno od prirode analiziranog problema.

Najjednostavniji instrumenti mjerenja buke jesu dozimetri, koji buku mjere tokom radnoga dana. Međutim, nivo je buke u industrijskome okruženju promjenjiv te, najčešće, složena karaktera, pa se, iz toga razloga, za mjerenje buke koriste i složeniji uređaji, kao što su to, primjerice, analizatori razine buke (vrše statičku analizu buke u toku vremena) i analizatori intenziteta buke (daju informaciju o veličini buke po jedinici površine u danoj poziciji).

Uređaji za sofisticiranija mjerenja, smješteni u laboratorijskim i pogonskim uvjetima i okruženjima, daju frekvencijski spektar u vidu Campbellovog dijagrama.

Na alatnim (i drugim) strojevima snimanje ukupne razine buke i frekvencijskog spektra vrši se na različitim mjernim mjestima i za različite snage, sa različitom udaljenošću mikrofona. Tada se, na osnovu frekvencije buke, određuje njen izvor i metoda kontrole (smanjenje ili potpuno uklanjanje) buke. Od mjerača razine buke se zahtijeva da mjeri zvuk (buku) različitog nivoa, spektra i oblika zvučnih valova u različitim uvjetima distribucije izvora zvuka i refleksije na granicama zvučnog polja.

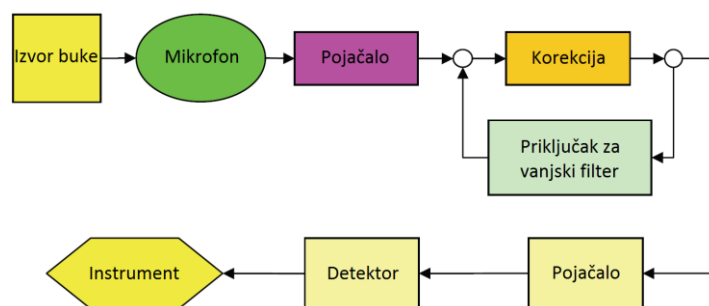
Mjerači razine zvuka se, po točnosti mjerenja, a prema IEC 651- 1979 i IEC 804- 1985 (IEC, eng. International Electrotechnical Commission), svrstavaju u četiri grupacije:

- Tip 0- Laboratorijski referentni standardi namijenjeni za kalibraciju drugih mjerača razine zvuka,
- Tip 1- Precizni mjerači razine zvuka za opću namjenu, općenito na terenu gdje se traže precizna mjerenja,
- Tip 2- Mjerači opće namjene za upotrebu na terenu i za snimanje podataka razine zvuka za daljnju analizu frekvencija,
- Tip 3- Istraživački mjerač razine zvuka koji služi za određivanje uvjeta okoline (po pitanju buke).

Prema složenosti, mjerači se razine buke dijele na:

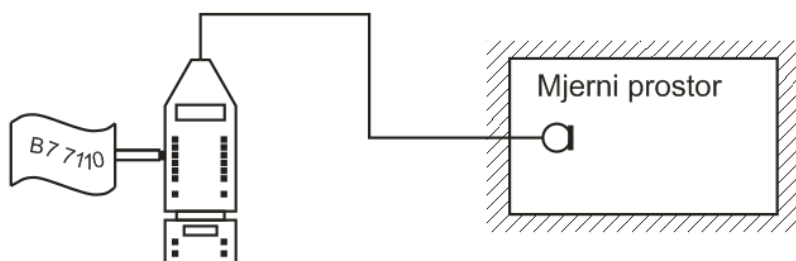
- Najjednostavnije mjerače buke ili dozimetre koji se koriste za mjerenje buke,
- Analizatore razine buke koji se koriste u dijagnostičke svrhe.

Mjerač buke, čija je tipična shema dana slikom 17, mjerno je sredstvo koje reagira na zvuk na način sličan reakciji ljudskoga uha. On daje objektivna reproduktivna mjerenja zvučnih razina. Zvučni se signal pretvara u električni signal pomoću mikrofona visoke kvalitete, a, kako je signal slab, postoji potreba da se isti pojača kako bi se mogao očitati na instrumentu. Poslije prvog pojačanja, signal prolazi kroz korektivni filter. Poslije daljnjeg pojačanja, signal je dovoljno jak da uzrokuje otklon na instrumentu. Efektivna vrijednost signala je određena u detektoru efektivne vrijednosti. Očitana vrijednost je razina buke u dB. Signal zvuka se može dobiti i sa izlazne utičnice te, time, voditi na vanjske instrumente (kao što su magnetofoni, dozimetri buke ili pisači). Efektivna vrijednost, RMS (eng. Root mean square), specijalan je oblik matematičke srednje vrijednosti, a važna je jer direktno zavisi od energije zvučnog signala. Također, postoji i mogućnost ugradnje detektora vršne vrijednosti, ako, naravno, postoji želja za određivanjem vršnih vrijednosti impulsnih signala.



Slika 17. Tipična shema mjerača buke [19]

Na slici 18 dat je prikaz principa mjerenja razine buke okoline.



Slika 18. Prikaz principa mjerenja razine buke okoline [19]

U nekoliko će slijedećih redaka (i slika), upoznavanja radi, biti prikazani (izgledom i karakteristikama) neki stvarni mjerači buke. Tako je, slikom 19, prikazan jedan tipični dozimetar, dok su njegove tehničke specifikacije date tablicom 11.



Slika 19. Tipični dozimetar [19]

Tablica 11. Tehničke specifikacije dozimetra [19]

Razina regulacije	70 dB (A) do 140 dB (A)
Odstupanje	0, 1 dB
Preciznost	$\pm 1, 5$ dB
Frekvencija	20 Hz do 10 kHz
Klasifikacija	ANSI SI. 25, ISO 1999, BS 6402

Mjerni sustav za mjerenje buke, prikazan slikom 20, čine dvije akvizicione jedinice NMT 3637B, mikrofonska jedinica za vanjsku upotrebu, tip 4198 i *software* 7802, danske

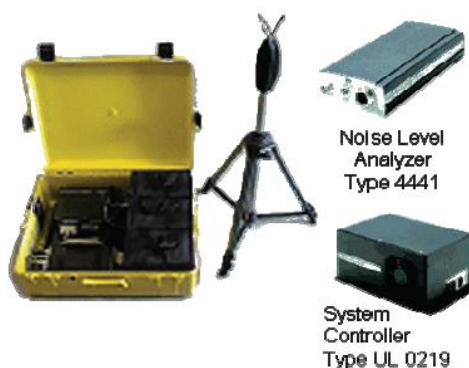
tvrtke Brüel & Kjær. U sustavu NMT 3637B su analizator razine buke, tip 4441, sistemski upravljač, tip UL 0219 (PC računalo), GPS prijemnik sa antenom, 35/ 36 TrackPak™, GARMIN i 3 akumulatorske baterije, svaka po 12 V. Mikrofonsku jedincu 4198 čine mikrofoni 4189, pretpojačalo 2669C, štitnik od vanjskih utjecaja (primjerice vjetra, kiše, ptica), kabel dužine 10 m i stalak. Sve komponente NMT i mikrofonske jedinice smještene su u prenosivu vodootpornu kutiju. Sistem je autonoman u pogledu napajanja i predviđen je za duži rad na otvorenom prostoru.



Slika 20. Konfiguracija mjernog sustava NMT 3637B [19]

NMT sistem vrši akviziciju akustičnih signala, a, zahvaljujući ugrađenom GPS prijemniku, na raspolaganju je i trenutna pozicija sistema. NMT omogućava i integraciju sa meteo stanicom radi dobivanja podatka o temperaturi, vlažnosti i tlaku. Ovaj sustav omogućava snimanje razine buke L_{eq} ili SPL na A ili linearnoj frekvencijskoj skali, sa SLOW, FAST, IMPULS ili PEAK detektorom. Postoji mogućnost definiranja SETL, NSETL i SENL nivoa, minimalno trajanje događaja da bi se izvršio zapis podataka na *hard disk* sistemskog upravljača. Analiza signala je oktavna ili tercna sa korakom od 1 ili 0,5 s, u opsegu od 12 Hz do 20 kHz. Analiza se vrši sa digitalnim filterima [19].

Komponente mjernog sustava NMT 3637B dane su slikom 21.



Slika 21. Komponente mjernog sustava NMT 3637B [19]

5. PREMAZI

Premazi su forma organskih prevlaka te se njima smatraju sve one prevlake koje kompaktno čini organska tvar tvorenjem opne. Općenitije, može se reći kako je premaz materijal koji je, nakon nanošenja na podlogu, stvorio čvrsti film [21], [22].

Primarna je funkcija svih prevlaka (pa tako i premaza) zaštita od korozije. Sekundarna funkcija (između ostalog) može biti postizanje određenih fizikalnih svojstava površine, zaštita od mehaničkog trošenja, postizanje željenog estetskog dojma ili povećanje dimenzija istrošenih dijelova, odnosno popravak loših proizvoda.

Zaštita metalnih konstrukcija premazima jedan je od najrasprostranjenijih postupaka zaštite u tehnici (što bi, kvantificirano i konkretizirano, značilo da je čak 75 % metalnih površina zaštićeno premazima). Jedan je od osnovnih razloga za spomenuto sama cijena premaza, koja je relativno niska (ako ju se usporedi sa drugim oblicima mehanizama površinske i antikorozivne zaštite).

Osnovni cilj nanošenja premaza jest razdvajanje metalne podloge od njena okoliša, što znači da oni, u uvjetima eksploatacije, moraju biti dovoljno postojani i trajni. Ta je trajnost premaza upravo i njegovo najvažnije tehničko svojstvo.

Premaz treba zadovoljiti dva uvjeta- mora tvoriti zaštitni film na površini materijala te mora biti otporan na vanjska djelovanja. Da bi se to postiglo, potrebno je ostvariti sloj koji neće sadržavati pore u sebi, a biti će dovoljno tanak.

Sustav zaštite premazima sastoji se, obično, od temeljnog sloja, jednog ili više međuslojnih slojeva te završnog sloja, od kojih svaki ima svoju ulogu. Sam će zaštitni efekt premaza ovisiti o:

- Prethodnom tretiranju površine metala,
- Debljini premaza,
- Svojstvima vezivnog sredstva, pigmentima i drugim aditivima.

Premazi se najčešće nanose višeslojno, a svrha im je većinom zaštitno- dekorativne naravi [22], [23].

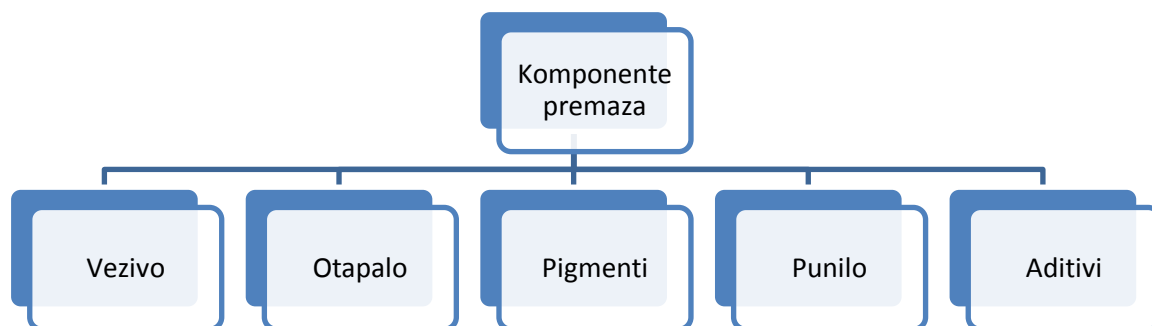
Pobrojano, svojstva bi dobrog premaza bila:

- Odvaja materijal i okoliš,
- Prionjivost,
- Nije podložan napadu bakterija,
- Ne bi smio otpuštati korozijske produkte prilikom razgradnje,
- Otporan je na abraziju, udar ili naprezanja u tlu,
- Vodonepropusnost,
- Otpornost na kapilarno upijanje,
- Siguran je za upotrebu,
- Ekološki je prihvatljiv,
- Osigurava električnu izolaciju materijala [23].

U nastavku će teksta biti definirane komponente i sustav premaza, prikazat će se moguće klasifikacije premaza te će se detaljnije obraditi postupci nanošenja premaza i ispitivanja njegove debljine.

5. 1. KOMPONENTE PREMAZA

Sva premazna sredstva sadrže vezivo (koje čini opnu prevlake) i otapalo/ razrjeđivač (koji obično otapa vezivo, a regulira viskoznost). Osim toga, premazna sredstva mogu sadržavati i netopljive praškove (pigmente i punila, koji daju nijansu i čine premaze neporoznima) te različite dodatke (aditive). Osnovne komponente premaza prikazuje slika 22.



Slika 22. Komponente premaza [24]

Vezivo čini neisparljivi dio medija boje. Radi se o organskim tvarima u tekućem ili praškastom stanju koje povezuju sve komponente premaznog sredstva, a, nakon nanošenja, stvaraju tvrdi zaštitni sloj. U određenom se premaznom sredstvu često kombiniraju različita veziva, a u svrhu postizanja željenih svojstava premaza. Valja istaknuti kako se vezivo premaznog sredstva bitno razlikuje od tvari koja čini opnu prevlake, ako ona nastaje kemijskim otvrdnjavanjem. Važna su veziva na osnovi sušivih masnih ulja, poliplasta, derivata celuloze, prirodnih smola, prirodnog ili sintetičkog kaučuka i bituminoznih tvari.

Otapala su hlapivi organski spojevi u kojima se vezivo otapa, ali pri tome ne dolazi do kemijskih promjena. Upotrebljavaju se za postizanje određene viskoznosti zaštitnih sredstava, tako da se ona mogu lako nanijeti na površinu materijala. Radi se, redovito, o niskoviskoznim i lako hlapivim smjesama na osnovi alifatskih, aromatskih i kloriranih ugljikovodika, alkohola, ketona i estera. Iste organske kapljevine često služe i kao razrjeđivači za sniženje viskoznosti premaznih sredstva i kao otapala za njihova veziva. Otapalo je dio boje koji se u boju dodaje pri proizvodnji, a razrjeđivač se po potrebi dodaje neposredno prije nanošenja.

Pri hlapljenju otapala u zrak, otpuštaju se pare koje su štetne za zdravlje ljudi i vrlo zapaljive, pa postoji opasnost od eksplozije. Iz tog je razloga današnja tendencija da se otapala zamjenjuju vodom.

Pigmenti su organske ili anorganske, obojane ili nebojane netopljive čestice u obliku praha, paste ili vlakana, koje su obično, već u proizvodnji, raspršene u premaznom sredstvu, čime se postiže neprozirnost i obojenje naliča, a redovito se poboljšava i njihovo zaštitno djelovanje, otpornost na svjetlo i grijanje te mehanička svojstva.

Pigmenti mogu biti dekorativni (za pokrivne premaze), antikorozijski ili u službi obiju funkcija. S obzirom na mehanizam zaštitnog djelovanja, postoje aktivni (temeljni premaz) i inertni (u svim premazima) zaštitni pigmenti. Aktivnost zaštitnih pigmenata osniva se na inhibiciji korozije, pasivaciji površine, katodnoj zaštiti metalne podloge te neutralizaciji kiselih tvari iz okoline. Inertnost se osniva na barijernom učinku.

Punila su bijele ili slabo obojene anorganske tvari netopive u primijenjenom mediju. U premaze se dodaju zbog poboljšavanja mehaničkih svojstava, mazivosti i svojstava tečenja,

radi povišenja i sniženja sjaja te zbog poboljšanja svojstava barijere filma, odnosno zbog otpornosti filma prema difuziji vode ili agresivnih plinova. Dobivaju se iz prirodnih minerala ili sintetskim taloženjem iz vodenih otopina. Prema kemijskom se sastavu mogu razvrstati u sulfate, karbonate, okside i silikate.

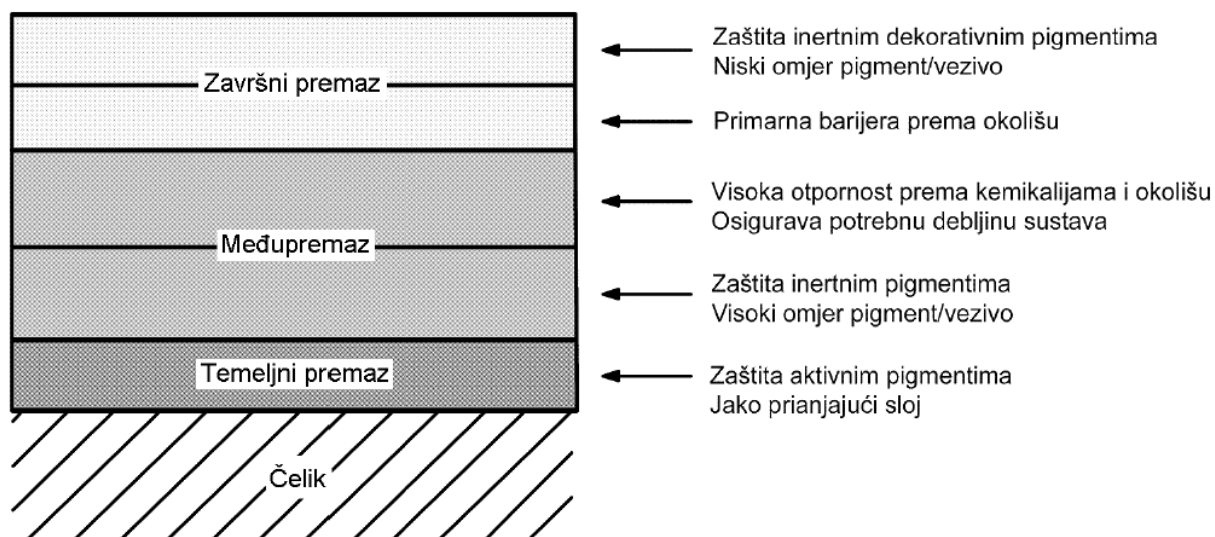
Aditivi su tvari koje, uključene u formulaciju premaza, unatoč malom udjelu, imaju značajan utjecaj na svojstva. Dodaju se kako bi se spriječili nedostaci u premazima (primjerice pjena, loše razlijevanje ili sedimentacija) ili da daju specifična svojstva (kao što su klizavost, vatrousporenje, svjetlostabilnost) koja se inače dosta teško postižu. Kod dodavanja aditiva, mora se paziti na njihovu koncentraciju. Naime, ukoliko je koncentracija veća, dolazi do pojave nuspojava (koje su izrazito nepoželjne). Prema nedostatku na koji djeluju, aditivi se mogu podijeliti na:

- Okvašivači i disperzanti,
- Reološki aditivi,
- Antipjeniči,
- Aditivi za poboljšanje izgleda površine,
- Sušila i katalizatori,
- Konzervansi,
- Svjetlosni stabilizatori,
- Korozijski inhibitori [24].

5. 2. SUSTAV PREMAZA

Kod višeslojnog sustava (kakav je prikazan slikom 23), premazi se, prema namjeni, dijele na:

- Temeljne premaze,
- Međupremaze,
- Završne premaze.



Slika 23. Višeslojni nepropustan sustav premaza [24]

Temeljni premazi se nanose izravno na metale (ili druge supstrate), pri čemu moraju osigurati dobru prionjivost na podlogu te pružiti zaštitu od korozije. Značajke temeljnog premaza jesu:

- Prionjivost- jaka veza sa podlogom,
- Kohezija- velika čvrstoća sloja,
- Inertnost- jaka otpornost na koroziju i kemikalije,
- Vezivanje s međupremazom- jaka veza s međupremazom,
- Elastičnost- da prati dilataciju podloge.

Temeljni premazi moraju biti kompatibilni sa velikim brojem pokrivnih premaza te omogućiti dugi vremenski interval premazivanja. Do nanošenja pokrivnog premaza može proći i nekoliko mjeseci, pa moraju biti otporni na atmosferilije.

Međupremaz se može sastojati od jednog ili više slojeva, a predstavlja vezu između temeljnog i završnog premaza. Mora dobro prijanjati na temeljni premaz, a i činiti dobru osnovu za prijanjanje završnog premaza. Međupremazi služe i kao povezni slojevi (eng. *tie coat*) između antikorozijskih premaza i premaza posebne namjene. Glavna svrha međupremaza je osigurati:

- Potrebnu debljinu sustava premaza,
- Jaku kemijsku otpornost,

- Nepropusnost na vlagu,
- Povećani električni otpor,
- Jaku koheziju,
- Jaku vezu između temeljnog i završnog sloja.

Završni premaz se nanosi ponad prijašnjih (ranije nanesenih) slojeva i daje tražene karakteristike površine (kao što su nijansa boje, stupanj sjaja, izgled ili otpornost na vanjske utjecaje). Manje je debljine od međupremaza, ali zbog visokog udjela veziva ima veću gustoću i tvori čvrsti sloj. Osim zaštitne funkcije, završni premazi mogu imati i specijalnu namjenu (kao što je sprečavanje širenja požara ili onemogućavanje sklizanja). Glavne su funkcije završnog premaza:

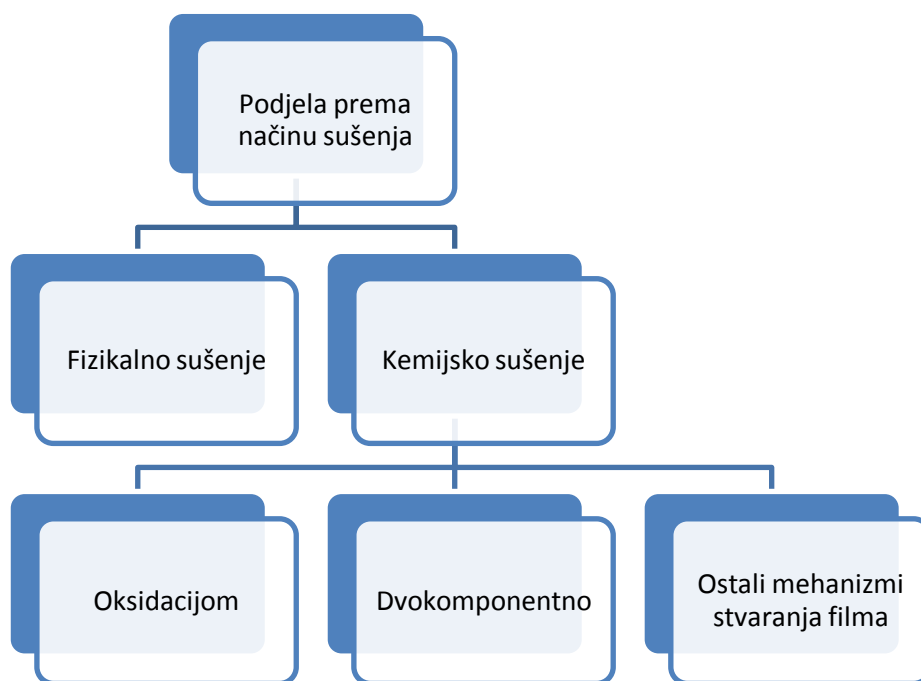
- Osigurati otpornost sustava premaza,
- Tvoriti prvu barijeru prema utjecajima okoline,
- Osigurati otpornost na kemikalije, vodu i različite vremenske uvjete,
- Osigurati otpornost na trošenje,
- Osigurati lijep izgled [24].

5. 3. KLASIFIKACIJA PREMAZA

Glavni su načini razvrstavanja premaznih sredstava:

- Prema sastavu, pri čemu se podjela obično zasniva na vrsti veziva (ali nekad i na vrsti pigmenta, odnosno razrjeđivača otapala),
- Prema osnovnoj svrsi (sredstva za zaštitu od korozije, od mehaničkog oštećivanja, od požara, od biološkog obraštanja, za električnu izolaciju, sredstva za dekoraciju...),
- Prema izgledu (bezbojne i različito obojene, mutne i sjajne),
- Prema podlogama na koje se nanose (crni i obojeni metali, beton, drvo...),
- Prema broju sastojaka koji se miješaju prije nanošenja (jednokomponentna, dvokomponentna i višekomponentna premazna sredstva),
- Prema ulozi u premaznom sustavu (temeljna, međuslojna i pokrivna premazna sredstva, kitovi...),
- Prema mehanizmu sušenja (fizikalno isparavanje razrjeđivača/ otapala, odnosno kemijsko otvrdnjavanje reakcijama u vezivu ili s vezivom).

Sa tehničkog je aspekta najzanimljivija podjela prema mehanizmu sušenja- na fizičko sušenje i kemijsko otvrdnjavanje [24]. Navedena je podjela prikazan slikom 24.



Slika 24. Podjela premaza prema načinu sušenja [24]

5. 4. POSTUPAK NANOŠENJA PREMAZA NA POVRŠINU MATERIJALA

Kod nanošenja premaza na površinu materijala, valja razlikovati nekoliko faza:

- Priprema površine,
- Priprema boje,
- Nanošenje premaza,
- Sušenje premaza.

Ove će faze, u daljnjem izlaganju, biti detaljnije obrađene.

5. 4. 1. PRIPREMA POVRŠINE

Priprema podloge za prevlačenje provodi se u cilju čišćenja i kondicioniranja površine konstrukcijskoga materijala, a u svrhu postizanja što čvršćeg prijanjanja prevlake. Postupkom čišćenja se s podloge moraju ukloniti sva labava i rahla onečišćenja (kao što su masne tvari, većina korozijskih produkata, prašina, valjaonička okujina, čađa, koks ili pepeo), dok se kondicioniranjem osigurava poželjna kakvoća podloge, odnosno tražena hrapavost.

Priprema površine je ključna za optimalni vijek trajanja premaza, jer nanošenje premaza na nepripremljenu podlogu rezultira nekvalitetnom zaštitom. Zanimljivo je spomenuti kako je, prema procjeni osiguravajućih društava, čak u 85 % slučajeva, razlog prijevremenog propadanja sustava zaštite loše pripremljena površina.

Za kvalitetnu pripremu površine (predobradu) potrebno je nekoliko operacija, što ovisi o odabranoj tehnologiji prevlačenja. Njihov izbor i redoslijed primjene mogu znatno varirati ovisno o vrsti materijala, o postojećem stanju površine i o stanju površine koje treba postići te o fazi izrade neke konstrukcije. Predobrada se, načelno, sastoji od:

- Operacije odmašćivanja- Odmašćivanje služi za odstranjivanje bioloških i mineralnih masnih tvari s površine metala. Neophodno je kod pripreme površine za nanošenje prevlaka kako bi prevlaka dobro prijanjala na metalnu površinu. Te tvari potječu od sredstava za hlađenje i podmazivanje pri mehaničkom oblikovanju obradaka odvajanjem čestica ili plastičnom deformacijom, od masnih prevlaka za privremenu zaštitu (za konzerviranje) ili od rukovanja golim rukama.,
- Mehaničkih operacija- U postupke mehaničkog čišćenja ubrajamo ručno mehaničko čišćenje, strojno mehaničko čišćenje, čišćenje vodenim mlazom i čišćenje mlazom abraziva. Ovi se postupci međusobno razlikuju prema području primjene i načinu provođenja, te imaju svoje zasebne prednosti i nedostatke, no polaze od istog principa- abrazivnog djelovanja (sa ili bez korištenja abrazivnih čestica) kojim se, sa površine materijala, uklanjaju neželjene supstance.,
- Kemijskih operacija- Najvažniji postupak kemijskog odstranjivanja korozijskih produkata jest otapanje hrđe i okujine sa ugljičnog i niskolegiranog čelika te sa lijevanog željeza kiselinskim dekapiranjem (nagrizanjem). Kiselina otapa površinski porozni sloj korozijskih produkata no, čim dotakne željeznu osnovu, dolazi do nepoželjne reakcije, pri čemu oštećuje obratke smanjujući im dimenzije, hrapavi površinu, uzrokuje vodikovu krhkost metala te se nepotrebno troši. Da bi se to oštećenje osnovnog metala usporilo, kiselinama se dodaju inhibitori korozije koji, već pri niskim koncentracijama, usporavaju koroziju čak 5 do 20 puta. Postupak čišćenja se obično provodi poslije vrućeg oblikovanja, toplinske obrade ili zavarivanja, kako bi se sa površine uklonili nastali oksidni slojevi, a koji nisu postojani na koroziju.,

- Plamenog čišćenja- Plamenim se čišćenjem mogu ukloniti debeli slojevi okujine, hrđe i drugih produkata korozije te starih premaza. Radi se o postupku zagrijavanja površine predmeta plamenicima pri čemu se, zbog različitih koeficijenata termičke ekspanzije, slojevi onečišćenja i podloga različito rastežu, što rezultira velikom napetošću u slojevima koji, shodno tome, pucaju i ljušte se. Kako, nakon primjene postupka, na materijalu zaostaju rahla onečišćenja, redovito je potrebno naknadno provesti i ispuhivanje, četkanje ili struganje. Plameno čišćenje je zastarjeli postupak pripreme površine i danas se rijetko primjenjuje kod gradnje novih konstrukcija, pošto nije moguće postići odgovarajuću kvalitetu podloge prije nanošenja premaza [24].

5. 4. 2. PRIPREMA BOJE

Postupak proizvodnje boje sastoji se od zamješavanja točno izvaganih komponenti, dispergiranja pigmenata u vezivu te homogeniziranja odnosno kompletiranja boje. Završna faza proizvodnog postupka obuhvaća završno filtriranje te punjenje u prikladnu ambalažu. Veće industrije koriste boje iz kontejnera, veličine 800 l do 1000 l, dok manje industrije i obrtnici uobičajeno koriste boju u kantama od 20 l. Izbor ambalaže ovisi o vrsti materijala koji se pakira, no, generalno govoreći, može se konstatirati da se radi o metalnoj ambalaži sa zvjezdastim poklopcem po cijeloj površini. Vodotopive i vodorazrjedive boje pakiraju se u plastičnu ambalažu (polipropilen i polietilen) kako ne bi došlo do korozije čelične ambalaže.

Boja, upakirana u tvornici, je temeljito dispergirana, sa potpuno suspendiranim pigmentima, te homogene konzistencije u pogledu teksture i nijanse. Kao takva, boja će, nakon nanošenja, tvoriti homogeni film te pružati zahtijevana zaštitna i estetska svojstva. Ipak, često se samo manja količina boje upotrijebi u kratkom vremenu od njezine proizvodnje te, uglavnom, do prve primjene prolazi i po nekoliko mjeseci. Na to ukazuje i praksa naručivanja boje za neko industrijsko postrojenje te, po dostavi, njeno skladištenje i čekanje potrebe za primjenom.

Kao zasebne cjeline, diferenciraju se radnje miješanja i razrjeđivanja boje.

Boje se moraju korektno izmiješati jer, u suprotnome, postoji opasnost taloženja pigmenta na dnu kontejnera što znači da će zaštitno svojstvo boje, nakon apliciranja, biti značajno manje. Miješanje boje provodi se strojno i ručno.

Razrjeđivači se u boju dodaju neposredno prije nanošenja, a svrha im je sniziti viskoznost i olakšati nanošenje boje. Njihova primjena ovisi o postupku nanošenja i temperaturi okoline. Rad sa razrjeđivačima zahtjeva povećani oprez, jer dolazi do zagađenja zraka i znatnog porasta opasnosti od trovanja, požara i eksplozije.

5. 4. 3. NANOŠENJE PREMAZA

Premazna se sredstva nanose četkama, lopaticama i valjcima, te postupcima prskanja, uranjanja, prelijevanja ili elektroforeze (te će oni, stoga, biti detaljnije razrađeni). Odabir odgovarajućeg postupka nanošenja boje ovisi o vrsti premaza, brzini rada, dostupnosti ventilacije, prihvatljivosti za okoliš te veličini, obliku i dostupnosti površine [24].

Tablica 12 prikazuje usporedbu produktivnosti različitih postupaka nanošenja premaza.

Tablica 12. Usporedba produktivnosti pojedinih postupaka nanošenja premaza [24]

Postupak nanošenja	Površina [m ² / dan]
<i>Četka</i>	93
<i>Valjak</i>	186- 372
<i>Zračno prskanje</i>	372- 744
<i>Bezračno prskanje</i>	744- 1115

5. 4. 3. 1. BOJENJE ČETKAMA

Nanošenje boje četkama je dugotrajan, zahtjevan i skup proces te se, ponajviše zbog spomenute dugotrajnosti, praktičari okreću drugim, bržim metodama. Ipak, četka je jedina metoda za primjenu boje u prostorima gdje je otežana ventilacija te u prostorima gdje postoji opasnost od požara ili eksplozije. Isto tako, kod rupičastih i grubih površina se

moгуćnost penetracije boje, postignuta ispravnom primjenom četke, ne može postići niti jednom drugom metodom.

To je razlog zašto četka ima veliku primjenu kod *stripe coating* postupka (prikazan slikom 25)- postupka kojim se dodatno zaštićuju spojevi, rubovi, zavari, prijelazi i druge neravne površine, a kako bi se ostvarila potrebna debljina sloja prevlake. Četka se primjenjuje i kod lokalnih popravaka premaza.



Slika 25. *Stripe coating* zavora u spremniku tereta [24]

Prednost je četkanja i činjenica da se može obavljati bez razrjeđivača. Proizvođači, naime, uglavnom proizvode boje koje imaju viskoznost prilagođenu ovoj vrsti nanošenja.

Nedostatak premazivanja četkama je niska produktivnost te pojava tragova (pruga) od kista, što uzrokuje lokalnu neravnomjernost debljine premaza i djeluje neestetski [24].

5. 4. 3. 2. NANOŠENJE BOJE LOPATICAMA

Lopaticice (spatule) služe za nanošenje kitova i nekih pastoznih premaza sa visokim udjelom suhe tvari. Time se dobivaju debele prevlake (debljine preko 0,1 mm) koje su često neravnomjerne i hrapave. Korištenjem lopatica postiže se slabije utrljavanje boje u odnosu na četkanje [24].

5. 4. 3. 3. BOJENJE VALJCIMA

Valjak se najviše upotrebljava pri apliciranju boje na širokim i ravnim površinama te žičanim pregradama. Valjci, u usporedbi s četkama, lošije utrjavaju boju, ali je sloj glatkiji i ravnomjerniji. Gubici pri nanošenju su minimalni, a razrjeđivač uglavnom ne treba dodavati. Nedostatak je primjene valjka u tome što, bez obzira na sposobnost zaduženog radnika, metoda ostavlja tanak i porozan sloj, zbog čega je penetracija vrlo slaba te je teško postići deblje premaze. Valjak se, zbog toga, ne preporučuje za nanošenje temeljnih premaza. Postupak je produktivniji od četkanja, a uglavnom se upotrebljava za završno lokalno dotjerivanje [24].

5. 4. 3. 4. PRSKANJE BOJE

Prskanje ili štrcanje boje i lakova je vrlo varijabilan postupak sa mnogim specifičnostima i prednostima pred ostalim postupcima. Prskanje se može obavljati komprimiranim zrakom te bezračnim ili elektrostatičkim postupkom.

Za zračno prskanje služe pištolji u koje se uvodi zrak (pod tlakom od 0, 12 MPa do 0, 5 MPa) i premazno sredstvo koje se zrakom raspršuje. Premazno se sredstvo u pištolj nasisava iz spremnika koji je montiran ispod raspršivača, i to podtlakom koji nastaje na ušću zračne mlaznice, ili se gravitacijom, odnosno stlačenim zrakom, tlači iz spremnika.

Za razliku od nanošenja boje četkama ili valjcima, kod nanošenja zračnim prskanjem potrebno je prilagoditi viskoznost boje kako bi se omogućilo njeno kvalitetno raspršivanje. Viskoznost valja sniziti dodavanjem razrjeđivača u boju, što produžuje sušenje, daje tanje i poroznije slojeve, povećava opasnost od požara i eksplozije te zagađuje radnu okolinu.

Rad pri niskim tlakovima i s velikom količinom zraka za posljedicu ima gubitak boje u okolinu uslijed preprskanja (eng. *overspray*), koji iznosi od 20 % do 50 %. Velik utjecaj na gubitak boje ima i pravilna tehnika nanošenja. Naime, udaljenost ušća pištolja od obradka trebala bi biti 150 mm do 200 mm, uz širinu mlaza oko 300 mm.

Glavna je prednost zračnog prskanja ravnomjerna debljina prevlake, njen visoko estetski dojam i visoka produktivnost. Zbog toga se ovaj postupak uvelike primjenjuje u automobilske industriji.

Zračno prskanje ilustrirano je slikom 26.



Slika 26. Primjena zračnog prskanja [24]

Kod bezračnog (eng. *airless*) postupka, mlaz premaznog sredstva nastaje u pištolju bez miješanja sa zrakom, tako da se boja snažno protjera kroz uzak otvor, mlaznicu, visokotlačnim potiskivanjem zrakom (pneumatski) ili pumpom za boju (hidraulički). Tlak se kreće od 1 MPa do 30 MPa. Najjednostavniji uređaji za bezračno prskanje jesu sprejevi, metalne doze pod tlakom ukapljenog plina, koji se upotrebljavaju u kućanstvima i kod manjih popravaka, te pištolj s membranskom pumpom.

Profesionalni bezračni uređaji redovito rade tlakovima iznad 10 MPa i daju usmjeren mlaz bez pojave magle, a primjena razrjeđivača obično nije potrebna (ili je minimalna). Produktivnost rada je zamjetno veća nego pri zračnom prskanju, a dobivaju se i deblje prevlake, pa je ponekad moguće smanjiti broj slojeva u premaznom sustavu.

Udaljenost između mlaznice i radnog komada treba, prilikom prskanja, iznositi od 300 mm do 400 mm.

Snažan mlaz pod visokim tlakom daje izvrsnu penetraciju, što je posebno važno pri nanošenju temeljnog premaza, ali otežava dobivanje potpuno glatkih prevlaka i smanjuje estetski dojam.

Mlaznica je definirana kutom lepeze koju stvara i otvorom. Nazivni, uobičajeni otvori su od 0, 23 mm do 0, 67 mm. Kutovi lepeze kreću se od 10° do 80°. Veći kut lepeze daje veću širinu prskanja. Širine prskanja su od 50 mm do 300 mm.

Bezračni je postupak ilustriran slikom 27.



Slika 27. Bezračni postupak nanošenja boje na nadvodni dio broda [24]

Za elektrostatsko je prskanje boja i lakova nužan visoki napon (30 kV do 150 kV) između pištolja i obradaka koji se obješeni na uzemljeni prijenosnik (obično lančani transporter). Ušće pištolja se redovito nabija negativno, a transporter s obradcima pozitivno. Zbog snažnog električnog polja se ionizira zrak između pištolja i podloge tako da se oko kapljica boje/ laka gomilaju ioni, što izaziva privlačnu Coulombovu silu između njih i uzoraka. Generator istosmjernog napona ugrađuje se u sam pištolj ili se smješta van njega. Potrebne su struje vrlo male (100 μ A do 200 μ A), pa i generator može biti malen.

Raspršivanje se uglavnom izvodi stlačenim zrakom. Premazno sredstvo se mora razrijediti, ali su gubici prskanjem minimalni (5 % do 10 %). Profilirane predmete s dubokim udubinama je nemoguće ravnomjerno prevući elektrostatskim prskanjem, jer unutar udubina nema električnoga polja (tzv. Faradayev kavez), pa se takva mjesta moraju obojiti nekim drugim postupkom [24].

5. 4. 3. 5. BOJENJE URANJANJEM I PRELIJEVANJEM

Uranjanje prvenstveno služi za nanošenje boja na manje predmete jednostavnog oblika, a koji se proizvode u velikim serijama. Boju je nužno razrijediti, a višak premaza nakon vađenja uzoraka ocijediti. Prednost uranjanja su minimalni gubici boje. Nedostatak je nemogućnost dobivanja jednolično debele prevlake na predmetima kompliciranog oblika.

Prelievanje je postupak koji je pogodan za veće rešetkaste i rebraste predmete (primjerice, za transformatorske kotlove) po čijim se površinama premazna sredstva lako razlijevaju. Boja se kroz mlaznice ili dugačke proreze (tzv. bojenje zavjesom) prelijeva na predmete, a višak se skuplja u spremniku ispod zone prelijevanja i ponovno primjenjuje. Na taj su način gubici premaznog sredstva neznatni. Premazna se sredstva razrjeđuju, kako bi se što ravnomjernije mogla razliti po obratku. Ujednačenost debljine prevlake se postiže na način da se obradak, nakon prelijevanja, drži oko 10 min iznad posude s razrjeđivačem (tj. u zraku zasićenom njegovim parama). Time se koči hlapljenje, što olakšava razlijevanje premaza u ravnomjernu i glatku prevlaku [24].

5. 4. 3. 6. NANOŠENJE BOJE ELEKTROFOREZOM

Elektroforeza je postupak kojim se boje metali u vodenim disperzijama ili otopinama boja i lakova, a u kojima postoje pozitivno ili negativno nabijene čestice polimernog veziva s pigmentima, pri čemu je voda suprotno nabijena. Pod djelovanjem istosmjernog električnog polja, čestice premaza putuju prema suprotno nabijenom obratku, a voda u suprotnom smjeru. Posljedica toga je dobivanje skoro suhog naliča. Postupak traje od 1 min do 5 min, a dobivaju se prevlake vrlo jednolične debljine. Postupak je pogodan samo za temeljne premaze debljine od 20 μm do 35 μm (primjerice, za karoserije automobila). Prikladnom formulacijom premaznog sredstva moguće je za elektroforezu upotrijebiti gotovo sva veziva (ali se najčešće upotrebljavaju akrilati, alkidi, poliesteri, epoksidi, aminoplasti i fenoplasti). Sami uređaji za nanošenje boje elektroforezom jako su slični galvanskim uređajima, ali je potreban mnogo viši napon (50 V do 300 V), uz gustoću struje od 0,1 A/dm² do 1 A/dm² [24].

5. 4. 4. SUŠENJE PREMAZA

Premazi se mogu sušiti fizički i kemijski (gdje pričamo o oksidacijskom i dvokomponentnom sušenju te drugim polimerizirajućim reakcijama).

Kod fizičkog se sušenja boja filmovi formiraju hlapljenjem otapala (što je fizička pojava, pa se takve boje nazivaju fizički sušenim bojama). Fizikalno se sušenje odvija u tri faze:

1. Brzo hlapljenje otapala s površine (što za posljedicu ima povećanje koncentracije polimera, a, u skladu s time, i smanjenje aktivne površine isparavanja),
2. Hlapljenje otapala difuzijom kroz slojeve koncentrirane polimerne otopine (što rezultira daljnjim povećanjem koncentracije polimera, a iz toga slijedi nepokretnost prisutnih makromolekula),
3. Hlapljenje preostalog otapala u filmu.

Nakon ovih triju faza, konačno se stvara polimer, suh na prašinu. Postupak stvaranja filma vođen je isključivo hlapljenjem otapala, što znači da je ispravan odabir otapala, kod ove vrste sušenja, od kritične važnosti. Fizikalnim se načinom suše visokomolekularni termoplastični polimeri (nitroceluloza, klorkaučuk, termoplastične akrilne smole, vinilne smole i bitumeni). Fizikalno se suše boje na bazi otapala i boje na bazi vode.

Kod oksidacijskog sušenja, film nastaje hlapljenjem organskog ili vodenog otapala i reakcijom kisika i veziva koji stvara konačan film. Ovoj su vrsti sušenja podvrgnuta ulja (bilo kao samostalna veziva, bilo kao modifikacija u nekim složenijim vezivima). Vrijeme sušenja ovisi o temperaturi. Reakcija kisika i veziva pri nižim temperaturama je puno sporija nego kod normalnih temperatura. Zbog sporosti reakcije, koriste se katalizatori koji ubrzavaju stvaranje filma. Oksidacijski se suše alkidi, uretan- alkidi i epoksi- esteri.

Boje koje se suše dvokomponentnim sušenjem se sastoje od osnove (baze) i sredstva za otvrdnjavanje (komponente). Film nastaje hlapljenjem otapala (ako je prisutno) i naknadnom kemijskom reakcijom između veziva i sredstva za otvrdnjavanje. Osnova i sredstvo za otvrdnjavanje se zamiješaju neposredno prije upotrebe. Ovim postupkom

otvrdnjavaju epoksidi, epoksi- vinili, epoksi- akrili, PUR poliesteri, PUR akrilne smole, PUR epoksi smole i PUR polieteri.

Kod drugih polimerizirajućih reakcija sušenja, film nastaje djelovanjem veziva s vlagom u okolini (jednokomponentni poliuretan), s ugljičnim dioksidom u zraku (silikati) ili lančanom reakcijom polimerizacije uslijed nekoliko sati provedenih pri povišenim temperaturama od otprilike 200 °C (silikon) [24].

5. 5. ISPITIVANJE DEBLJINE PREMAZA

Debljina sloja premaza predstavlja izrazito bitan parametar određivanja kvalitete izolacije metalne površine. Ona je mjerodavna za zaštitno djelovanje, trajnost zaštite, učestalost pora, tvrdoću i elastičnost premaza. Pretanki sloj, naime, zbog mogućih pora ili nedovoljne pokrivenosti površine, najčešće ne daje zadovoljavajuće zaštitno djelovanje, dok, s druge strane, predebeli sloj može dovesti do pogrešaka u premazu. Mjerenje i kontrola debljine sloja se provode sukladno normi HRN EN ISO 2808, koja uključuju kontrolu mokrog i suhog filma premaza [25], [26].

Na debljinu filma premaza utječe:

- Tehnika aplikacije (kist, valjak, zračno ili bezračno prskanje),
- Vrsta premaza koji se aplicira na površinu,
- Uvjeti kod kojih se apliciranje provodi (atmosferski utjecaji, vjetar, pristupnost površini),
- Ljudski faktor (vještina izvođača apliciranja premaza),
- Profil i kvaliteta pripremljene površine na koju se premaz nanosi [24].

Pri ocjenjivanju premaza treba mjeriti njegovu lokalnu debljinu i to na onim mjestima mjerodavne plohe gdje se očekuje da će ta debljina biti najmanja (jer je kvaliteta premaza definirana upravo tom minimalnom debljinom). Takvo je mjesto relativno lako odrediti mjerenjem debljine prevlake na nekoliko mjesta, pri čemu pomaže i načelno poznavanje raspodjele debljina koja ovisi o profilu predmeta i o načinu nanošenja premaza. Otpornost na koroziju kod većine premaza raste sa povećanjem debljine. Ipak, samim time rastu i

proizvodni troškovi, pa je pouzdano poznavanje minimalne vrijednosti debljine premaza potrebno i iz ekonomskih razloga.

Postoje brojne metode za testiranje debljine filma, a izbor ovisi o:

- Lokaciji (laboratorij ili teren),
- Materijalu koji se premazuje (magnetični ili nemagnetični metal, drvo, žbuka, cigla, plastika),
- Uvjetima premazivanja (vlažni ili suhi),
- Stanju površine (oblikovana ili ravna, glatka ili gruba, tanka ili debela).

Mjerači debljine filma premaza najčešće mjere debljinu filma na metalnoj podlozi koja se premazivanjem štiti od korozije. Za magnetske podloge (primjerice, od čelika ili lijevanog željeza), mjerači se baziraju na magnetskim svojstvima. Za nemagnetične podloge (kao što su aluminij i mjed), koriste se električni mjerači debljine filma premaza. Prvi je korak, pri izboru mjerača, odrediti koja će se premazana podloga ispitivati, a zatim je klasificirati u magnetske ili nemagnetične. Tablica 13 daje podjelu najčešće korištenih metalnih podloga i njihovu klasifikaciju prema magnetičnosti.

Tablica 13. Podjela najčešće korištenih podloga za premazivanje prema magnetičnosti [25]

Magnetične metalne podloge	Nemagnetične metalne podloge
Čelik	Aluminij
Lijevano željezo	Bakar
Blago prekaljeni čelik	Cink
Magnetični nehrđajući čelik	Nemagnetični nehrđajući čelik

Ako nije unaprijed moguće odrediti o kakvoj se podlozi radi, potrebno je izvršiti test magnetom. Magnet se postavi blizu premazane podloge i, ako ga ona privuče, debljina filma premaza može se mjeriti magnetskim mjeračem debljine. Analogno tome, ako podloga ne privuče magnet, potrebno je koristiti mjerače za nemagnetične podloge.

Mjerači debljine filma su tvornički označeni sa oznakom F (od eng. *ferrous*) za magnetične metalne podloge i sa N ili NF (od eng. *non-ferrous*) za nemagnetične metalne podloge. Također, postoje i kombinirani mjerači označeni oznakom F/ N ili F/ NF koji automatski prepoznaju tip podloge i prilagođavaju joj metodu mjerenja.

Jedan je od zahtijeva pri odabiru mjerača debljine premaza i očekivana debljina filma, na osnovu koje se mora odrediti mjerno područje mjerača.

Noviji suvremeni instrumenti su najčešće izvedeni sa nekoliko mjernih područja, s time da se performanse mogu optimizirati unutar jednog mjernog područja. Dobra je smjernica, pri izboru prikladnog mjerača, da se napravi proba na određenom premazu, a da, pri tome, očekivana debljina premaza ne prelazi 80 % od mjernog područja mjerača. (primjerice, ako je očekivana debljina premaza 500 μm , mjerno područje mjerača mora biti najmanje do 625 μm za preciznija mjerenja). Sve češće se koriste i kombinirani višeslojni premazi gdje se kombiniraju pojedini premazi da bi se postigla ukupna željena debljina premaza i što bolja zaštita od korozije. Također, treba naglasiti da nanošenje premaza vrlo često nije precizno (pa se, primjerice, može dogoditi da debljina mokrog filma premaza na čeliku varira i 20 % oko predviđene debljine).

U svakome slučaju, mora postojati fizička razlika između svojstava podloge i premaza (kao što je to kod magnetične podloge s nemagnetičnim premazom ili vodljive podloge s nevodljivim premazom) [25]. Tablica 14 može se koristiti kao orijentir za izbor mjerača debljine.

Uobičajeno se propisuju minimalne debljine sloja [23]. Karakteristične su debljine, ovisno o karakteru okoline, dane tablicom 15.

Tablica 15. Minimalne propisane debljine premaza, ovisno o karakteru okoline [23]

Karakter okoline	Minimalna debljina sloja [mm]
<i>Konstrukcija u prirodi</i>	0, 125
<i>Konstrukcija u gradskoj sredini</i>	0, 180
<i>Konstrukcija u maritimnim uvjetima</i>	0, 250
<i>Konstrukcija u krugu teške industrije</i>	0, 300

Mjeriti se može debljina mokrog i suhog filma premaza.

5. 5. 1. MJERENJE DEBLJINE MOKROG FILMA PREMAZA

Debljina mokrog filma premaza predstavlja debljinu premaza neposredno nakon nanošenja na metalnu površinu. Nju je potrebno kontrolirati jer predstavlja preduvjet za postizanje propisane debljine suhog filma. Odnos debljine suhog i mokrog filma premaza ovisi o količini otapala koje hlapi prilikom sušenja. Kontrolom debljine mokrog filma premaza, izvođač kontrolira svoju tehniku nanošenja, a koja, u konačnici, utječe na ispunjavanje zahtjeva za potrebnom minimalnom debljinom suhog premaznog filma. Ako se, primjera radi, mjerenjem utvrdi da je nanijeto previše mokrog filma boje, pristupa se promjeni tehnike rada (i to na način da se smanji broj prolaza kod prskanja ili ubrza sam rad).

Za kontrolu debljine mokrog filma boje koristi se instrument „češalj“. Njegovo ime potječe iz očite sličnosti sa svakodnevnim predmetom osobne higijene i dotjerivanja. Naime, instrument po stranicama ima redove zubaca s rastućim razmacima od zamišljene površine. Sa zupca, na kojemu je vidljiv otisak boje nakon pritiska instrumenta u svježi premaz, se očita visina razmaka koja označava debljinu mokrog filma boje, kako je i prikazano slikom 28 [24].



Slika 28. Mjerenje debljine mokrog filma premaza „češljem“ [24]

5. 5. 2. MJERENJE DEBLJINE SUHOG FILMA PREMAZA

Mjerenje debljine suhog filma premaza možemo podijeliti na destruktivne (razorne) i nedestruktivne (nerazorne) metode.

5. 5. 2. 1. DESTRUKTIVNE METODE

Kod destruktivnih metoda dolazi do fizičkog uništenja uzorka, a sam postupak je dugotrajniji i skuplji. Zbog toga se u operativnoj kontroli i mjerenju češće koriste nedestruktivne metode (koje omogućavaju dobivanje brze informacije s vrlo jednostavnim postupkom mjerenja).

U destruktivne metode spadaju:

- Metode mjerenja pomoću mikrometra,
- Mjerenja igličnim mjeračima,
- Mikroskopske metode,
- Metoda mjerenja Sabergovim svrdlom.

Kad se mala ploha ili listić oljušti s površine premazanog objekta, njegova se debljina može direktno mjeriti korištenjem mikrometra. Alternativno, ukupna debljina podloge i premaza može se mjeriti, a kako bi se, zatim, podloga izmjerila nakon uklanjanja premaza strugačem ili otopinom. Debljina premaza je razlika između ova dva mjerenja.

Princip mjerenja debljine suhog filma igličnim mjeračima zasniva se na prodiranju igle mjerača kroz suhi film, sve do metalne podloge. U mnogim slučajevima, slojevi premaza su tako tvrdi da se opiru penetraciji igličnih mjerača, pa se igla zamjenjuje svrdlom ili dlijetom.

Kod upotrebe mikroskopa za mjerenje debljine filma, pripremi se presjek uzorka, a debljina premaza mjeri se pomoću mjerne skale u okularu mikroskopa. Postoje različite metode mjerenja debljine suhog filma pomoću mikroskopa:

- Kod Brighweelove metode, na filmu se napravi mala brazda ili se otkine mala krhotina. Snop svjetla projicira se na odabranu površinu pod kutom od 45° . Lom zrake svjetlosti ispituje se mikroskopom koji ima mikrometar u vidnom području okulara. Aparatura za ovu metodu dostupna je u obliku Schmaltz optičkog analizatora površine.,
- Kod Stopped metode, na uzorku se oštirim nožem napravi rez, a zatim se mikroskopom fokusiraju naizmjenice gornji i donji rubovi reza. Debljina filma računa se iz vertikalnih podešavanja mikroskopa.,
- Tooke inspekcijski uređaj za mjerenje debljine suhog filma utvrđuje debljinu filma iz geometrije V- žlijeba urezanog u film pomoću specijalnog alata. Ovaj V- žlijeb se promatra vertikalno kroz svjetlosni mikroskop. Operator mjeri bočnu udaljenost od gornjeg ruba žlijeba te projekcije presjeka žlijeba i podloge.

Metoda koja koristi Sabergovo svrdlo slična je prethodno opisanoj Tookovoj metodi. Razlika je u tome da se, za penetraciju u film, koristi okruglo svrdlo. Nastala rupa se ispituje mikroskopom koji posjeduje skalu, a daje uvećanje $\times 50$. Širina reza od vanjskog ruba do otiska gdje svrdlo penetrira u podlogu je izmjerena debljina filma premaza [25].

5. 5. 2. 2. NEDESTRUKTIVNE METODE

Nerazorni postupci ili metode najpopularniji su način mjerenja debljine suhog filma premaza. Temelje se na razlikama fizikalnih svojstava prevlaka i podloge. Dijelev se na:

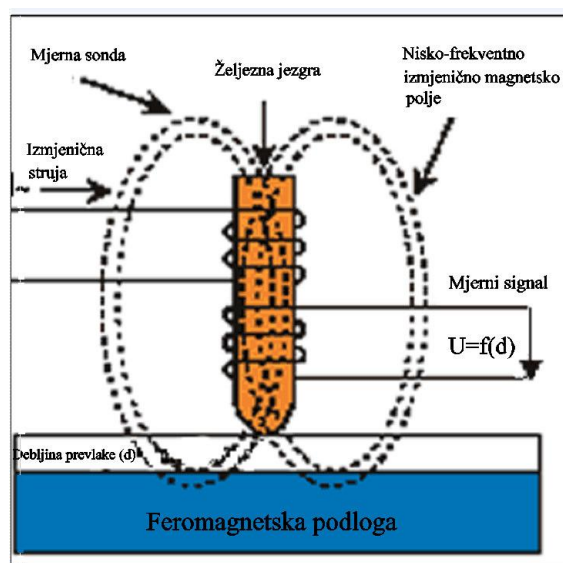
- Magnetske metode,
- Metodu vrtložnih struja,
- Metodu povratne disperzije β - zraka,
- Metodu rendgenske fluorescencije,
- Kapacitivnu metodu,
- Optičke i druge metode.

Mjerenje magnetskim metodama moguće je ako se magnetska svojstva prevlake i podloge dovoljno razlikuju. Uređaji za mjerenje debljine premaza sa permanentnim magnetom mogu se upotrebljavati za određivanje debljine filmova premaza koji su naneseni na magnetične podloge (kao što su čelik, željezo ili magnetični nehrđajući čelik), osiguravajući da je premaz nemagnetičan. Materijali kao što su nikal i kobalt, koji su prirodno magnetični, trebaju se posebno tretirati, dok boje koje sadrže magnetične čestice, kao što je magnetični željezni oksid, mogu uzrokovati grešku ukoliko se upotrebljavaju uređaji za mjerenje debljine sa permanentnim magnetom. Primjer uređaja za nedestruktivno mjerenje debljine filma premaza magnetskom metodom prikazan je slikom 29.



Slika 29. Roll- back magnetski uređaj za mjerenje debljine prevlake [27]

Magnetski uređaji za mjerenje debljine premaza koriste princip da je privlačna sila između permanentnog magneta i magnetične metalne podloge obrnuto proporcionalna s udaljenošću među njima. Princip mjerenja debljine prevlake magnetskom metodom prikazan je na slici 30.



Slika 30. Princip mjerenja debljine prevlake magnetskom metodom [27]

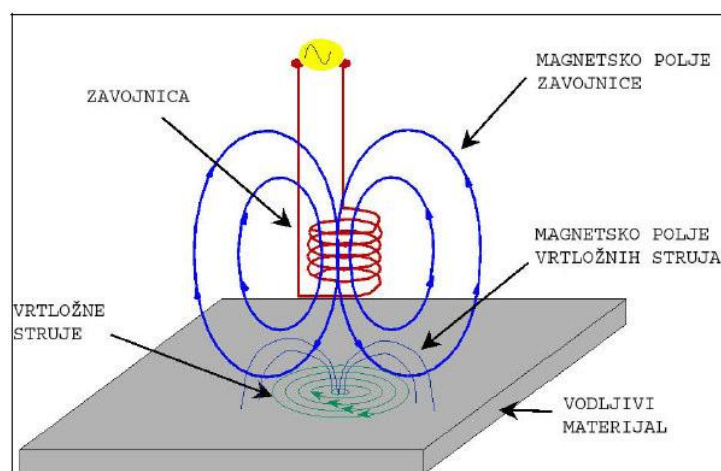
Osnovna ograničenja kod primjene uređaja za magnetsko ispitivanje debljine suhog premaza jesu:

- Film mora biti dovoljno čvrst da se spriječi urezivanje,
- Film ne smije biti ljepljiv tako da drži magnet za površinu premaza.

Mjerenje debljine filma metodom vrtložnih struja temelji se na razlici u električnoj vodljivosti između prevlake i podloge.

Metoda se koristi na premazima nemagnetičnih metala. Ne može se koristiti za mjerenje debljine filma na neravnim površinama, kao ni na platiniranim materijalima.

Princip se bazira na efektu da visoko frekventivno izmjenično polje (3 MHz) postaje električki vodljiva površina uzrokujući vrlo lokaliziran strujni tok vrtložnih struja. Ove struje kreiraju svoju vlastitu impedanciju u zavojnici, stvarajući visoko frekventno polje. Veličina impedancije je funkcija udaljenosti mjerne sonde od površine metala, odnosno debljine premaznog filma. Osnovni princip metode vrtložnih struja prikazan je slikom 31.



Slika 31. Osnovni princip metode vrtložnih struja [27]

Skala instrumenta je kalibrirana u jedinicama debljine premaza. Uzorak se ne oštećuje prilikom ispitivanja.

Za osiguranje točnosti, vrlo je važno kalibrirati instrument, odnosno podesiti nulu na pomoćnom komadu metala istog tipa, istog oblika i debljine kakav je i uzorak koji će se mjeriti. Mjerna sonda se postavi na površinu za ispitivanje pomoćnog uzorka i odredi se nulta točka.

Dostupni instrumenti koriste analogni, digitalni ili mikroprocesorski dizajn. Mnogi mikroprocesorski instrumenti nude dvostruku mogućnost za elektromagnetsku indukciju na željeznim (F) i neželjeznim (N) materijalima s instrumentom koji koristi princip vrtložnih struja i koji ima dva različita dizajna sonde. Primjer uređaja za mjerenje debljine suhog filma premaza principom vrtložnih struja dan je slikom 32.



Slika 32. Uređaj za mjerenje debljine premaza metodom vrtložnih struja [28]

Metoda povratne disperzije β - zračenja služi za mjerenje debljine prevlaka na temelju ovisnosti refleksije nazivnih zračenja (tj. mlaza elektrona) od nekog materijala o rednom (atomskom) broju njegovih atoma. Elektroni se, pri refleksiji, odbijaju u različitim smjerovima pa se ta pojava naziva povratnom disperzijom.

Metoda rendgenske fluorescencije služi za kontrolu gotovo svih kombinacija prevlaka/ podloga, a temelji se na izlaganju uzorka X- zrakama, što izaziva sekundarno zračenje s valnom duljinom ovisnom o rednom broju prisutnih atoma. Kako X- zrake prodiru kroz film i jednim dijelom kroz podlogu, u spektru fluorescentnog zračenja biti će valnih duljina karakterističnih za oba materijala. Što je debljina filma veća, intenzitet njene fluorescencije je veći, a intenzitet fluorescencije podloge manji. Maksimalne mjerljive debljine iznose obično od 8 μm do 80 μm , ali je donja granica mjerljivosti čak 0,02 μm .

Kapacitivna metoda može poslužiti za mjerenje debljine nevodljivih prevlaka s poznatom dielektričnošću na vodljivim (uobičajeno metalnim) podlogama. Mjeri se kapacitet kondenzatora C , koji čini uzorak s prevlakom i prislonjenom metalnom pločicom površine S . Debljina prevlake dobiva se prema izrazu (11), gdje je ϵ_r relativna dielektričnost prevlake

(primjerice, za Al_2O_3 iznosi oko 7, 5), ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$), a C izmjereni kapacitet.

$$\delta = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{C} \quad (11)$$

Nerazorne optičke metode koriste se za kontrolu debljine prozirnih premaza, pri čemu se mjeri:

- Pomak optičkog sustava mikroskopa kada se slika fokusira na površinu prevlake (obično označene mekom olovkom), odnosno podloge,
- Razmak između brazda nastalih izlaganjem uzorka monokromatskom svjetlu poznate valne duljine, tj. interferencijom zraka odbijenih od površine prevlake sa zrakama odbijenim od podloge,
- Razmak između dviju interferencijskih brazda nastalih iz zrake što pod kutom od 45° pada na uzorak, dajući zraku koja se odbija od prevlake i zraku koja se odbija od podloge (metoda svjetlosnog presjeka),
- Promjena ponašanja polariziranog svjetla pri refleksiji od osvijetljenog uzorka na kojem se nalazi prozirna prevlaka (elipsometrija),
- Intenzivnost refleksije svjetla s obojenog uzorka anodiziranog aluminijsa (fotoelektrički postupak mjerenja dubine nijanse).

Značajka optičkih metoda je usko ograničena primjenjivost [25].

6. PREMAZI KAO OBLIK ZAŠTITE OD BUKE

Buka, kao oblik zvučnog zagađenja, a kako je već i izloženo u ranijim točkama ovoga teksta, predstavlja jednog od glavnih zagađivača prirode. Ipak, zvučno zagađenje ne pogađa samo prirodno okruženje, već, između ostalih, i ono industrijsko, gdje može izrazito negativno utjecati na ljudsko zdravlje.

Jedan je od ključnih načina rješavanja toga problema i razvoj materijala koji će efikasno apsorbirati buku.

Premazi se, tradicionalno, u industriji koriste kroz njihovo nanošenje na površine različitih konstrukcija, a sa svrhom pružanja određenog oblika površinske zaštite ili poboljšanja estetskog dojma [29], [30]. Najnoviji proizvodni i istraživački trendovi idu u smjeru razvoja premaza kao autonomnog oblika zaštite od buke.

Postoji, naime, cijeli niz mogućih rješenja problema vibracija i (rezultirajuće) buke dinamičkih sustava, koji se, svakako, mogu primijeniti i na industrijsko okruženje. Njih možemo podijeliti na:

- Aktivne metode,
- Polu- aktivne metode,
- Pasivne metode.

Aktivna kontrola buke uključuje korištenje svojevrstnih aktivnih elemenata (poput zvučnika ili mikroprocesora) koji će stvarati određeni „kontra- fazni“ signal kako bi se zvučni poremećaj poništio. S druge strane, uobičajene pasivne metode podrazumijevaju zvučne apsorbere, zvučne barijere ili, primjerice, prigušivače buke. Kod polu- aktivnih metoda se aktivna kontrola koristi kako bi se, na ovaj ili onaj način, pojačala prigušujuća svojstva pasivnih elemenata.

I dok je ponekad (za osjetno smanjenje razine buke) potrebno tek promijeniti krutost ili masu dinamičkog sustava (kakvog bi, recimo, činio neki pogonski stroj), zvučni se valovi i vibracije najčešće moraju sanirati rasipanjem korištenjem prigušujućih materijala.

Upravo u skupinu pasivnih oblika zaštite spada uporaba premaza kao vida zaštite od buke. Takav je pristup kontrole zvuka jednostavniji za implementaciju te jeftiniji od aktivnih ili polu- aktivnih metoda. On svoju primjenu ne nalazi samo unutar proizvodnih postrojenja, već i na brojnim drugim područjima (poput automobilske i zrakoplovne industrije ili kod električnih komponenti) [31], [32].

Velika je prednost zvučnog prigušenja premazima i velika mogućnost industrijske robotizacije (ako se koriste sprejevi). Ona, kroz određeni niz godina primjene ove metode (dovoljan za amortizaciju uložених sredstava), može rezultirati značajnim uštedama (za robotske ruke koje bi obavljale posao nisu potrebne zdravstveno- zaštitne mjere te one, ovisno o trajanju postrojenja, mogu biti jeftinije od ljudskih radnika), ali uz velike inicijalne financijske investicije.

Na žalost, valja spomenuti kako je područje uporabe premaza u svrhu zaštite od buke još uvijek, dokumentacijski i literaturno, uvelike ograničeno na različite brošure proizvođača ili iskustva laika, dok je u akademskom smislu gotovo neobrađeno [31].

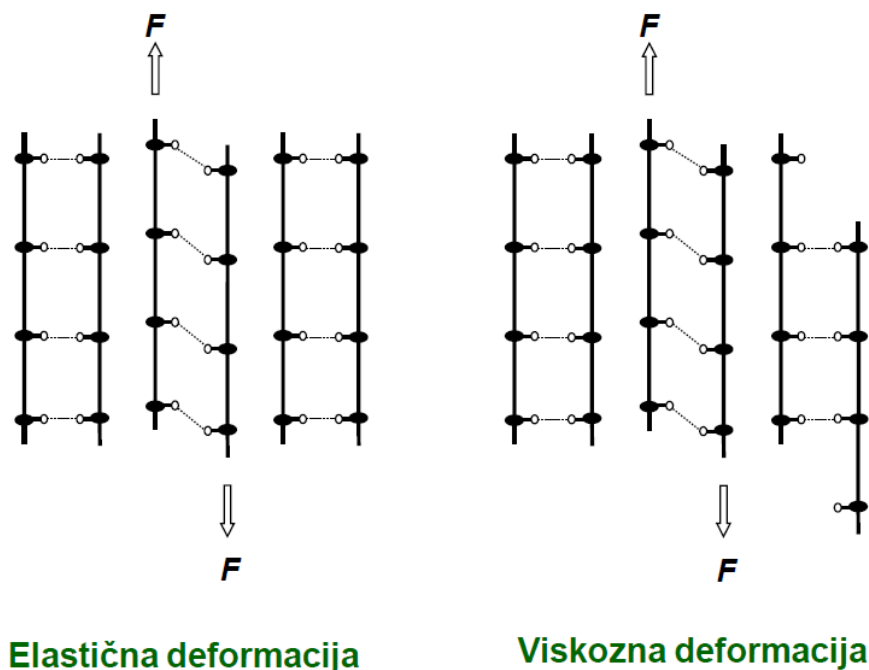
U daljnjem će tekstu biti objašnjeno osnovno načelo prigušenja buke (viskoelastičnim) premazima te će se dana situacija sagledati i sa stajališta upotrebe nanočestica.

6. 1. OSNOVNO NAČELO PRIGUŠENJA I SVOJSTVO VISKOELASTIČNOSTI

Osnovno je načelo prigušenja buke premazom pretvorba vibracijske energije u toplinsku, odnosno ekstrakcija mehaničke energije iz vibrirajućeg sustava da bi ona prešla u toplinski oblik [32], [33].

Svojstvo koje sustavu omogućava takvo ponašanje jest svojstvo viskoelastičnosti. Viskoelastičnost bi se mogla interpretirati kao odgovor danog materijala na određeni podražaj, gdje materijal, u isto vrijeme, pokazuje svojstvo viskoznosti jednog fluida i elastičnost krutine. Elastični materijal, kakav, primjerice, čini oprugu, bi se, po istezanju i ispuštanju iz rastegnutoг stanja, vratio u svoju prvobitnu poziciju. S druge strane, kada bi se na isti način istegnulo viskozno tijelo, ono bi taj oblik i zadržalo. U viskoelastičnom materijalu (VEM) se ta dva svojstva spajaju. On se vraća u svoje prvobitno stanje nakon što smo ga

podvrgnuti određenom naprezanju, ali to radi dovoljno sporo da, svojim stanjem, stigne kontrirati idućem ciklusu vibracija. Proces relaksacije na površini materijala je baza dilatacijskih reoloških viskoelastičnih svojstava [31], [34]. Razlika između elastične i viskozne deformacije (deformacije krutine i fluida), dana je slikom 33.



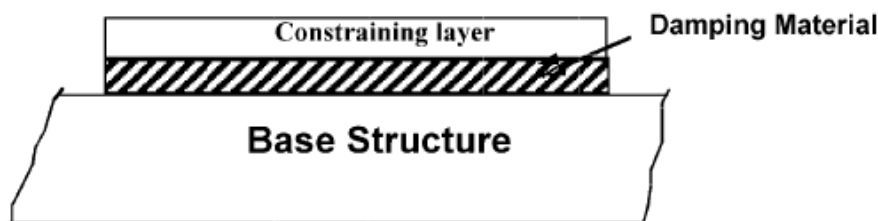
Slika 33. Razlika između elastične i viskozne deformacije [35]

Hoće li se materijal ponašati viskozno ili elastično ovisi, prije svega, o temperaturi i stupnju (frekvencijskog) opterećenja. Svojstvo viskoelastičnosti će izrazito ovisiti o okolnim uvjetima koji, osim temperature i frekvencije vibracija, mogu uključivati i čimbenike kakav je vlažnost.

Valja razjasniti kako se vibracijsko te, analogno tome, zvučno- prigušujuća svojstva korištenjem viskoelastičnih materijala mogu postići brojnim pristupima i metodama, a ne samo nanošenjem premaza. Osnovni su mehanizmi viskoelastičnog prigušenja buke:

- Prigušenje ograničavajućim slojem,
- Podesno viskoelastično prigušenje,
- Prigušenje slobodnim slojem.

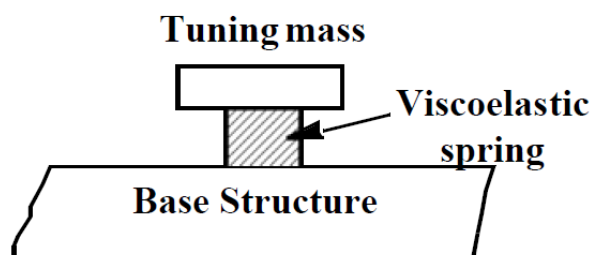
Prigušenje ograničavajućim slojem (eng. Constrained- layer damping, CLD) prikazano je slikom 34.



Slika 34. Prigušenje ograničavajućim slojem (CLD) [31]

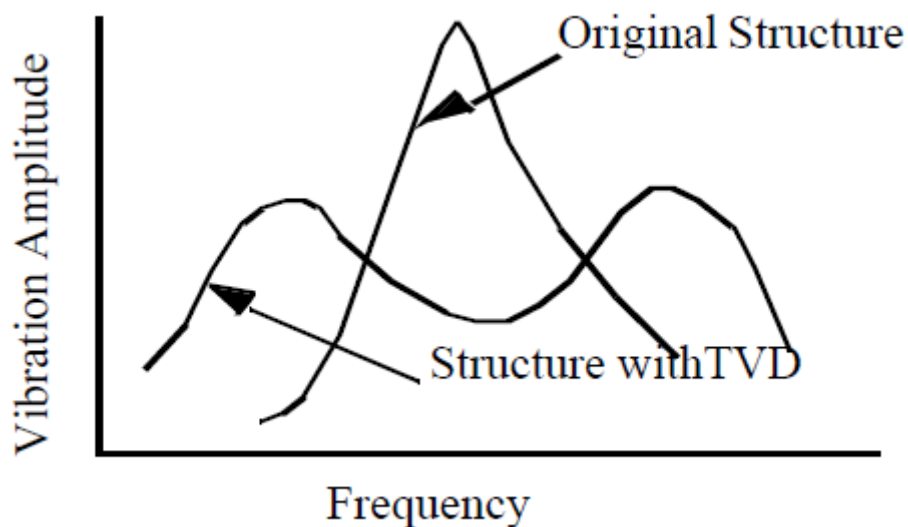
Kako slika i ukazuje, CLD konstrukciju tvori „sendvič“ dvaju vanjskih elastičnih slojeva i jezgre koju čini viskoelastični materijal. Kada se baza konstrukcije izloži savijajućim vibracijama, viskoelastičan materijal se, zbog gornjeg krutog sloja, mora lateralno deformirati. CLD je efikasniji od prigušenja slobodnim slojem jer se više energije rasipa u toplinu (radom lateralnog širenja viskoelastičnog materijala). Kod prigušenja ograničavajućim slojem, uobičajeno se koriste prigušujuće trake. One su građene od tanke metalne folije prekrivene viskoelastičnim adhezivom. Simetrična konfiguracija u kojoj viskoelastična jezgra i ograničavajući sloj imaju istu debljinu pokazala se najefikasnijom izvedbom jer maksimalizira lateralnu deformaciju jezgrenog materijala. CLD ima veliku primjenu u automobilske industriji.

Slikom 35 prikazano je podesno viskoelastično prigušenje (eng. Tuned viscoelastic damper, TVD).



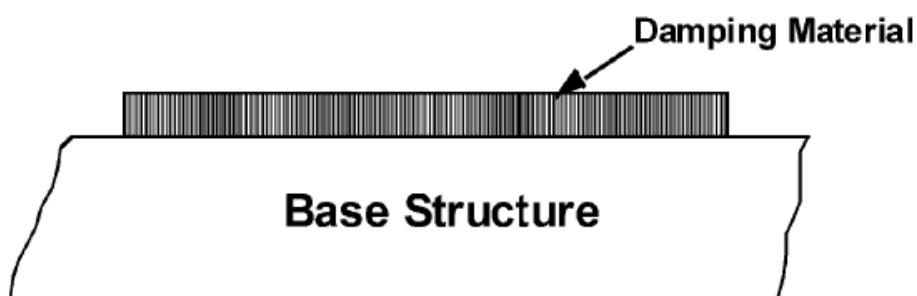
Slika 35. Podesno viskoelastično prigušenje (TVD) [31]

Očito je, radi se o strukturi sličnoj dinamičkim apsorberima (eng. Tuned mass damper), sa tom razlikom da je u sustav dodan viskoelastični materijal kako bi osigurao disipaciju energije. TVD se obično koristi kako bi smanjili buku koja svoje izvorište nalazi u uskom frekvencijskom pojasu (ili jednoj jedinoj frekvenciji). Pravilno podešen TVD može eliminirati neželjenu rezonancu dijeleći vršnu frekvencijsku amplitudu na dva dijela, gdje jedan dio završi ispod, a drugi dio iznad prvobitnog rezonirajućeg frekvencijskog sustava (što se i vidi na slici 36).



Slika 36. Rezultat rada TVD- a [31]

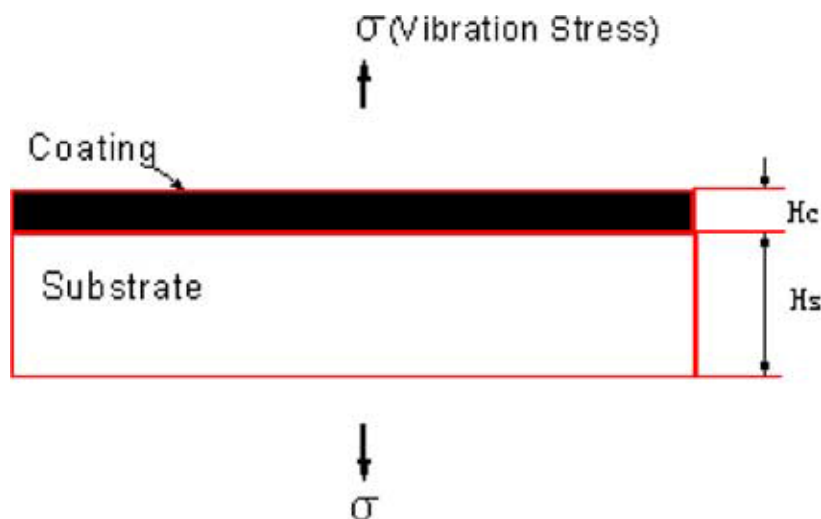
Slika 37 prikazuje djelić sustava prigušenja slobodnim slojem (eng. Free- layer damping, FLD).



Slika 37. Prigušenje slobodnim slojem (FLD) [31]

Kada kod FLD- a dođe do savijanja bazične konstrukcije, viskoelastični se materijal deformira primarno u vidu rastezanja i komprimiranja u ravninama paralelnim sa baznom konstrukcijom. Petlja histereze (gdje na sustav ne utječe samo njegovo sadašnje, već i ono prijašnje environmentalno stanje) cikličkih opterećenja i naprezanja rasipa energiju. Stupanj prigušenja je ograničen debljinom i težinom. Prigušujući materijal se na podlogu nanosi raspršivanjem ili spajanjem pomoću adheziva osjetljivog na pritisak. Konačno, u ovu skupinu potpada i korištenje premaza u svrhu zaštite od buke [31].

Ako vrijedi model opterećenja kakav je prikazan slikom 38, čvrstoća nekog tijela (sustava), postavljenog u vibracijsko okruženje, može se izraziti kompleksnim modulom E^* , kako je dano jednačbom (12) [36].



Slika 38. Skica sustava viskoelastičnog premaza i bazne strukture pod vibracijskim opterećenjem [36]

$$E^* = E' + iE'' \quad (12)$$

Ovdje E' predstavlja modul pohrane (eng. *storage modulus*), dok je E'' modul gubitka (eng. *loss modulus*). Kako izraz (12) predstavlja zapis modula E u njegovom kompleksnom obliku (sa realnim i imaginarnim članom), modul se može opisati i na način kako je dano jednadžbom (13), što je i češći način zapisa [36], [37].

$$E = \sqrt{E'^2 + E''^2} \quad (13)$$

Gornji parametri svoju važnost nalaze pri izražavanju faktora gubitka $\tan \delta$ (gdje je kut δ fazni kut između sinusoida opterećenja i naprezanja) koji nam služi kao mjera prigušenja. On je izražen omjerom imaginarnog i realnog člana kompleksnog modula E^* , kako je dano i jednadžbom (14) [36].

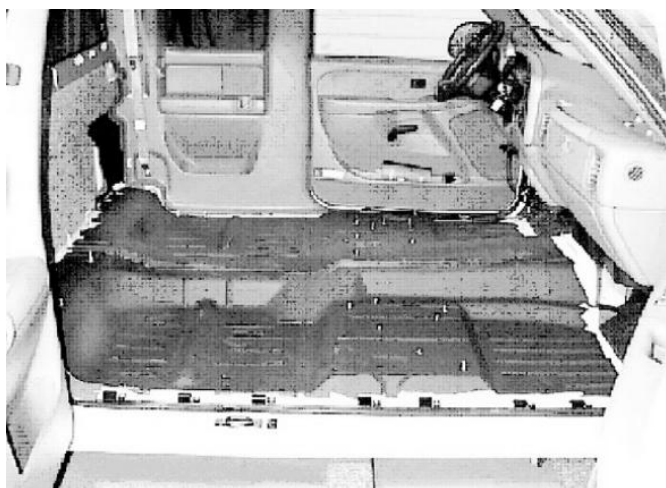
$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (14)$$

Izrazito je teško poboljšati prigušujući kapacitet materijala, a u isto vrijeme osiguravati njegovu strukturalnu čvrstoću. To jest problem jer brojne primjene materijala zahtijevaju baš tu kombinaciju svojstava- čvrstoću i krutost uparenu sa dobrim prigušujućim svojstvima. Kako je E modul elastičnosti koji predstavlja svojevrsnu mjeru krutosti tijela, a $\tan \delta$ mjera sposobnosti prigušenja, logično se nalaže da je njihov umnožak, $E \cdot \tan \delta$, koristan član koji opisuje sposobnost materijala da zadovolji oba svojstva. Ipak, takvi

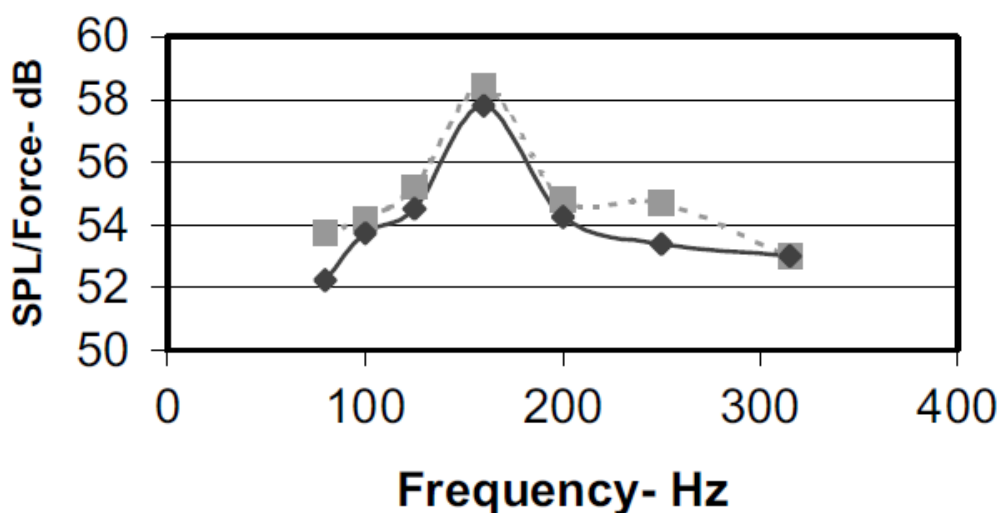
materijali nisu česti te se uzima kako, generalno i najčešće, vrijedi $E \cdot \tan \delta \leq 0,6 \text{ GPa}$. Isto tako, vrijedno je spomena kako teoretska istraživanja ukazuju kako postoji optimalna debljina premaza (ili premaznog sustava) koja će ponuditi optimalan balans između svojstva premaza da priguši (zvučne) vibracije i njegove čvrstoće [36].

Svojstvo same viskoelastičnosti pokazuju brojni materijali (poput gume, plastike ili raznih spojeva silicija ili vinila) čije su karakteristike dugi molekulski lanci.

Slikom 40 prikazan je rezultat praktičnog testiranja prigušljivosti viskoelastičnog premaza. Na podnu je strukturu automobila (slika 39) nanijet vodorazrjedivi premaz akrilnih elastomera u debljini od 1 mm do 3 mm. Rezultati mjerenja uspoređeni su sa rezultatima mjerenja dobivenim u istim radnim i okolišnim uvjetima, ali bez nanijetog premaza.



Slika 39. Automobilaska struktura iskorištena za testiranje [31]



Slika 40. Dobiveni rezultati ispitivanja uspoređeni sa referentnim vrijednostima [31]

Kako gornja dobivena linija prikazuje stanje bez viskoelastičnog premaza, a donja situaciju sa njime, vidi se kako je određena razina prigušenja postignuta.

Valja naglasiti kako, pri konstruiranju zaštite viskoelastičnim premazom, osim gore spomenute temperature, radnih (frekvencijskih) uvjeta i vlage, na umu treba imati i krutost bazne površine te debljinu sloja kojeg ćemo nanijeti. Cilj bi nam trebao biti postići premazni sustav koji će pružiti potrebno prigušenje, uz najnižu cijenu (troškove) i što manju masu, uz očuvanje krutosti prvobitnog sustava te održanje proizvodnih (ili drugih radnih) svojstava stroja na koji premaz nanosimo [31].

6. 2. ULOGA NANOČESTICA U PREMAZIMA

Teško je pronaći tehnologiju koja je posljednjih godina privukla toliko pažnje poput nanotehnologije. Taj nam fenomen savršeno objašnjava znanstvena istraživačka praksa- nanotehnologija (ili nanoznanost) je na svakom području u koje ju se nastojalo implementirati (materijali, kemija, fizika, strojarstvo i brojna druga područja) rezultirala pozitivnim pomakom (napretkom). Trend rasta popularnosti i interesa za nanotehnologiju nalaže kako postoji ozbiljna šansa da će ona, kroz određeni vremenski period, učiniti današnju tehnologiju (prerano) zastarjelom, dok neki autori spominju i novu industrijsku revoluciju.

Kako je materijalni svijet građen od atoma, a time i fizički rezultati strojarskih aktivnosti, tako svojstva materijala izrazito ovise o posloženosti tih atoma. U tome leži ogromna potentnost nanotehnologije- budućnost nam donosi mogućnost proizvodnje (i konstruiranja) proizvoda sa ultimativnom preciznošću [38].

Već je dugo vremena jasno kako smanjivanjem materijala možemo povećati njihovu efikasnost. Ipak, novija istraživanja pokazuju kako se mnoga svojstva materijala, koja se očituju na nanorazini, poprilično (a ponekad i fundamentalno) razlikuju od odgovarajućih im svojstava na makrorazini (čime se područje primjene nanosustava još više proširilo). Ljudsko znanje o uzroku tih novih svojstava materijala (pronađenih u nanosvijetu) još je uvijek nepotpuno. U nedostatku pouzdanih metodologija predviđanja spomenutih svojstava, kao česti nazivnik identifikacije i diferencijacije, nudi se veličina (kojom tada možemo definirati nanočestice).

ISO TS27687 opisuje nanosvijet:

- Nanorazina- veličina od oko 1 nm do 100 nm,
- Nanoobjekt- materijali sa jednom, dvije ili tri eksterne dimenzije na nanorazini.

Shodno tome, pojavni su oblici nanoobjekata:

- Nanoštapovi (eng. *nanorods*)- jedna dimenzija na nanorazini,
- Nanoploče (eng. *nanoplates*)- dvije dimenzije na nanorazini,
- Nanočestice (eng. *nanoparticles*, NP)- sve tri dimenzije na nanorazini.

Donja je granica od 1 nm eksplicitno odabrana kako bi se izbjegla identifikacija atoma (ili manje grupe atoma) nanoobjektima ili elementima nanostrukture. ISO TS27687 za definiciju čestice primjenjuje važeću ISO 14644 definiciju koja opisuje česticu kao sićušan dio (komad) tvari sa definiranim granicama ili plohama, a koji se može kretati kao jedinica [39].

Kako ljudi, generalno, nisu navikli raditi sa česticama tih veličina, teško je pojmiti o koliko se sićušnim veličinama radi. Stoga je zgodno povući paralelu i kazati kako je debljina vlasi ljudske kose oko 80. 000 nm, dok je promjer spirale DNK tek 2 nm [40].

Prema ulozi koju nanočestice imaju u praktičnoj primjeni, možemo ih podijeliti u dvije skupine:

- Monofunkcionalne nanočestice- osiguravaju samo jednu funkciju,
- Multifunkcionalne nanočestice- nude širi dijapazon funkcija.

Nanočestice se, izuzev gornje podjele, mogu dijeliti i prema svome sastavu:

- Nanočestice koje sadrže anorganske elemente, čiju jezgru, uobičajeno, čine metali i metalni oksidi (Fe_3O_4 , zlato, srebro, TiO_2 , SiO_2 i sl.),
- Nanočestice bazirane na organskim molekulama (ugljične nanocijevi, liposomi i sl.) [41].

Očekuje se kako će nanotehnologija imati značajan utjecaj na medije za pohranu računalnih podataka, poluvodiče te, između ostalog, područja biotehnologije i kemije. Jedno od područja na kojima je nanotehnologija već ostavila stanoviti utjecaj jesu sustavi premaza.

Iako se znanost premaza sa godinama praktične primjene polako razvijala, nikada (do sada) nije došla do točke u kojoj bi mogla ponuditi premaz koji će zadovoljiti sve potrebe pojedinog potrošača. Upotreba nanočestica u premazima mogla bi riješiti navedeni problem [38].

Nanopremazi, za početak, nude gušći proizvod. Također, u njihovom se djelovanju očituje svojstvo velikog površinskog područja prema jedinici mase nanočestice [38], [42]. Druge prednosti koje nano premazi nude jesu:

- Bolji izgled površine,
- Dobra kemijska postojanost,
- Bolja korozivna svojstva (veća otpornost na koroziju),
- Povećana toplinska stabilnost,
- Površina se lako čisti,
- Bolja toplinska i električna vodljivost,
- U prirodi može djelovati anti- refleksirajuće,
- Dobro prijanjanje na različite tipove materijala [38].

Samim time, korištenjem nanočestica u službi premaza, možemo dobiti premaze koji su otporni na abrazijsko trošenje, korozijski postojani, temperaturno stabilni, postojani u vlažnim uvjetima, otporni prema UV zračenju, samo- čisteći, nezamagljujući, sposobni promijeniti boju i ekološki prihvatljiviji [38], [40], [43].

Ipak, nanopremazi imaju i neke nedostatke. Velik problem primjene nanočestica u premazima predstavlja disperzija i stabilnost nanočestica. Isto tako, kod upotrebe posebice finih čestica, razvija se problem slabog očvrnuća sloja. Također, iako se trenutni nanopremazi smatraju ekološki prihvatljivima, uvijek postoji opasnost razvoja novog i toksičnog materijala. Valja spomenuti i kako neki autori navode da nanočestice u ljudskome organizmu mogu katalizirati određene kemijske reakcije koje bi mogle djelovati opasno po zdravlje pojedinca [38].

Primjena nanočestica u premazima za smanjenje razine buke jedan je od onih primjera gdje upotreba nanomaterijala jednostavno poboljšava svojstva koja taj materijal ima na makrorazini. Dva se mehanizma nude kao mogući razlozi ove pojave:

1. Disipacija energije uslijed klizanja dodirnih površina osnovne strukture i premaza s nanočesticama,
2. Disipacija energije zbog međusobnog klizanja površina nanoobjekata na nanorazini.

Premaz bogat nanočesticama, sa porastom njihove količine, sve više pospješuje oba spomenuta mehanizma (jer u klizanju, na bilo koji od spomenutih načina, sudjeluje više tijela tj. površina).

Pojedina istraživanja pokazuju kako se implementacijom određenih nanomaterijala ne povisuje samo faktor gubitka $\tan \delta$, već se suvereno i u boljoj mjeri (nego kod primjene viskoelastičnih premaza bez nanočestica) čuva mehanička čvrstoća i krutost površine strukture na koju je premaz nanesen.

Najprominentnijim se nanomaterijalom za implementaciju u sustav premaza čine ugljične nanocijevčice. One su se, zbog svojih karakteristika, već prometnule u svojevrsan super- materijal u brojnim granama strojarstva, a čini se (te se, prema broju provedenih istraživanja, dade zaključiti) kako će i u sustavima nanopremaza igrati bitnu ulogu [44], [45].

7. EKSPERIMENTALNI DIO

Provedeno je preliminarno ispitivanje razine zvučnog prigušenja kojeg nudi komercijalni Fonochrom premaz za zaštitu od buke, tvrtke Chromos boje i lakovi d. d.

U svrhu ispitivanja, korištene su dvije čelične ploče dimenzija 60 cm x 60 cm, te debljine 1 mm. Na jednu je ploču nanijet sloj Fonochrom premaza debljine 700 µm, dok je druga ploča ostala „prazna“.

Fonochrom premaz jest masa na osnovi vodene disperzije polimera (ne sadrži azbest), uz dodatak specijalnih punila, koja je specifično namijenjena za zvučnu i toplinsku izolaciju unutarnjih stijena u vagonogradnji. Ona prigušuje vibracije, služi kao toplinski izolator te pruža hrapavu površinsku strukturu uz maksimalnu debljinu sloja bez curenja od 3 mm.

Prije nanošenja premaza, prethodni sloj mora biti osušen, očišćen od svih nečistoća, odmašćen i dostatno hrapav. Ovisno o načinu nanošenja, masa se (prema potrebi) može razrijediti čistom vodom. Uvjeti nanošenja premaza jesu minimalna temperatura od 5 °C te temperatura podloge koja mora biti najmanje 3 °C iznad točke rosišta. Premaz se nanosi zračnim štrcanjem, lopaticom ili kistom, a sušenje traje maksimalno 24 sata, uz temperaturu od 20 °C te relativnu vlažnost zraka od 50 %, za debljinu mokrog sloja od 1 mm do 2 mm.

Premaz se skladišti u suhim i zračnim prostorijama na temperaturama u rasponu od 5 °C do 25 °C. Minimalna trajnost jest 12 mjeseci [46]. Tablicom 16 dana su pojedina svojstva Fonochrom premaza.

Tablica 16. Pojedine karakteristike Fonochrom premaza [46]

Gustoća	Oko 1070 kg/ m ³
Preporučena debljina suhog filma	1 do 1, 5 puta veća od debljine podloge na koju se nanosi
Teoretska potrošnja	2, 68 l/ m ² (za debljinu suhog filma od 1000 µm)
Pakiranje	Limena ambalaža od 20 l i 200 l

Ispitivanje je provedeno koristeći gluhu komoru (eng. *anechoic chamber*, komora obložena visoko apsorpcijskim materijalom kojim se eliminira mogućnost reflektiranja zvučnog vala [47]) Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. U nju je postavljen mjerac razine buke, dok se izvan nje nalazio zvučnik koji je predstavljao izvor konstantne buke od 500 mV (slika 41). Izvor buke i mjerac razine buke bili su odijeljeni vratima visoke razine izolacije, na kojima se nalazio otvor za umetanje ispitne ploče (slika 42).

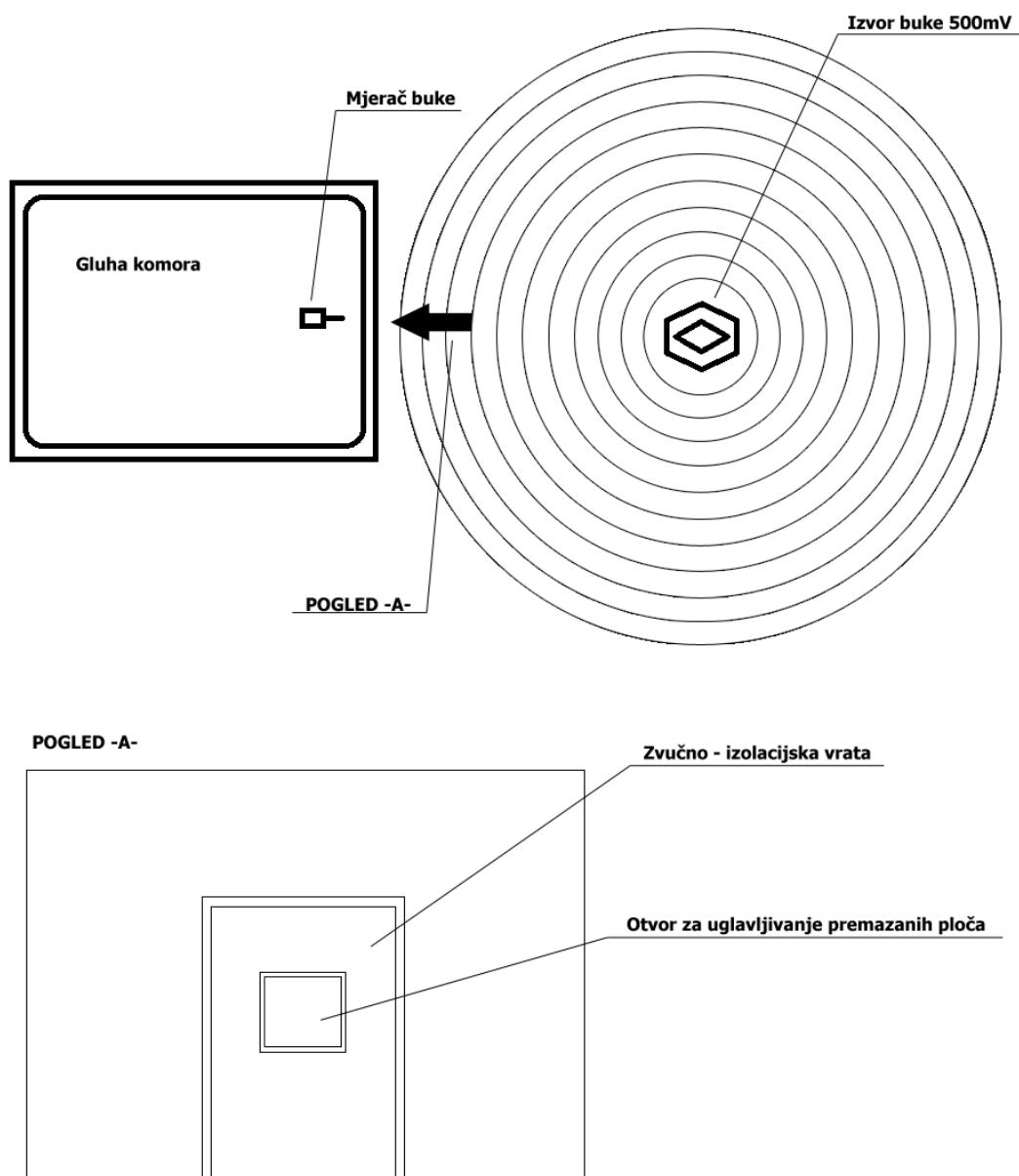


Slika 41. Izvor buke od 500 mV



Slika 42. Vrata dijele zvučnik od gluhe komore i mjerača razine buke

Postavljeni je sustav shematski prikazan slikom 43.



Slika 43. Shematski prikaz postavljenog sustava

U spomenuti je otvor vrata (slika 44) prvo umetnuta ploča bez Fonochrom premaza, a zatim premazana ploča. Promatralo se kolika će razina emitirane buke doprijeti do mjerača postavljenog u gluhu komoru, iza zatvorenih vrata sa umetnutom odgovarajućom pločom.



Slika 44. Vrata i otvor za umetanje premazane ploče

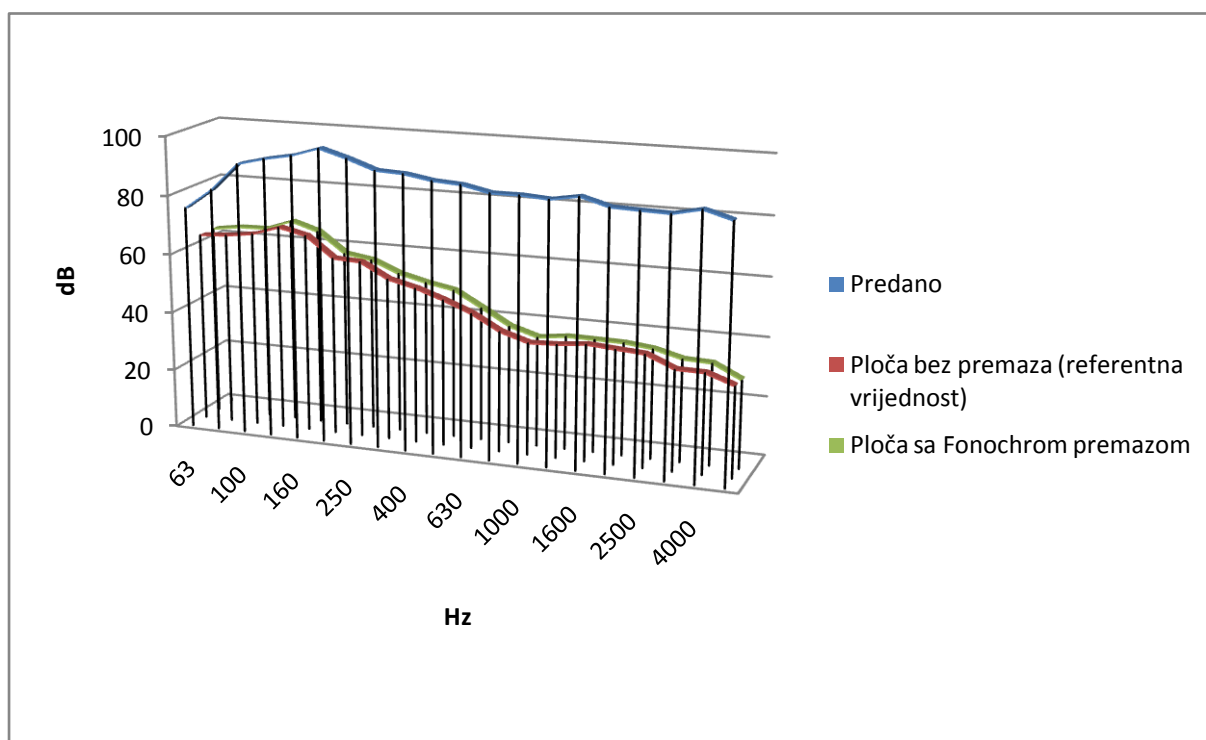
Izmjereni su rezultati međusobno uspoređeni, gdje je mjerenje izvršeno pomoću ploče bez premaza poslužilo kao svojevrsna referentna vrijednost vrednovanja prigušujućih svojstava premaza. Ti su (usporedni) rezultati dani tablicom 17, dok je uspješnost zvučnog prigušenja grafički prikazana slikom 45 (3D graf), slikom 46 (2D graf) i slikom 47 (*bar chart*).

Tablica 17. Rezultati ispitivanja

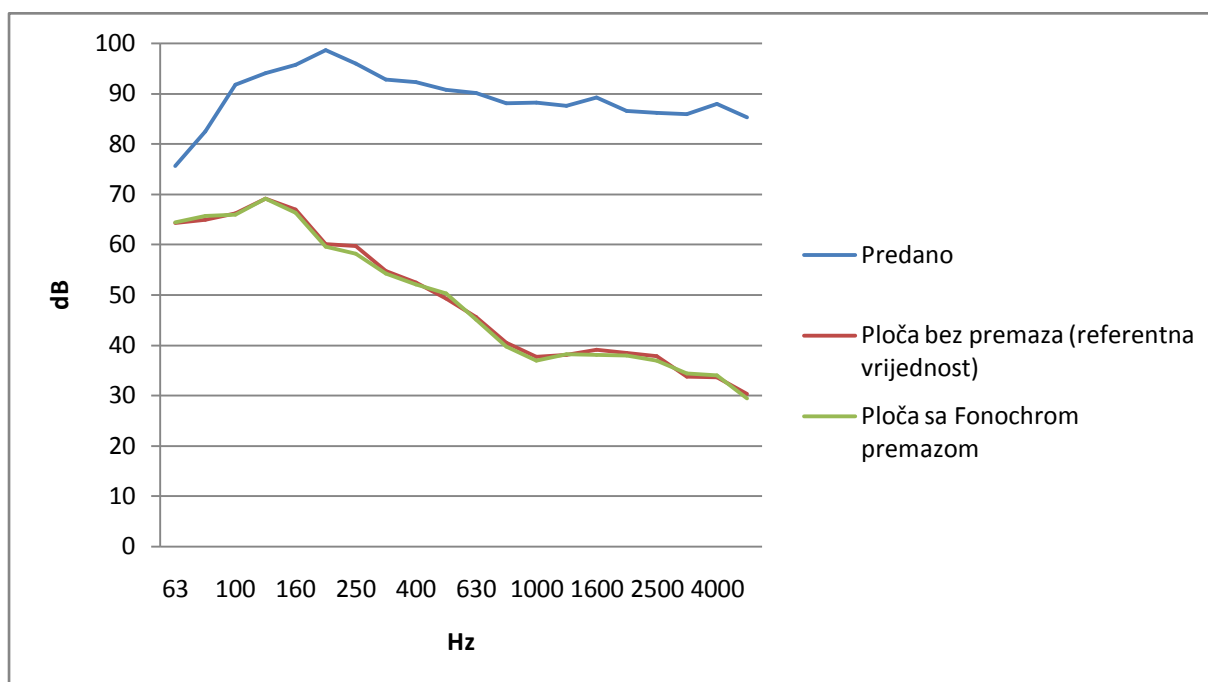
Predano [dB]	Izmjereno [dB]	
	<i>Ploča bez premaza (referentna vrijednost)</i>	<i>Ploča sa Fonochrom premazom</i>
75, 64	64, 30	64, 41
82, 44	64, 89	65, 68
91, 71	66, 16	65, 90
94, 01	69, 11	69, 19
95, 73	67, 01	66, 36
98, 68	60, 13	59, 59
95, 98	59, 67	58, 15
92, 73	54, 70	54, 30
92, 31	52, 46	52, 03

Tablica 17. Rezultati ispitivanja- nastavak

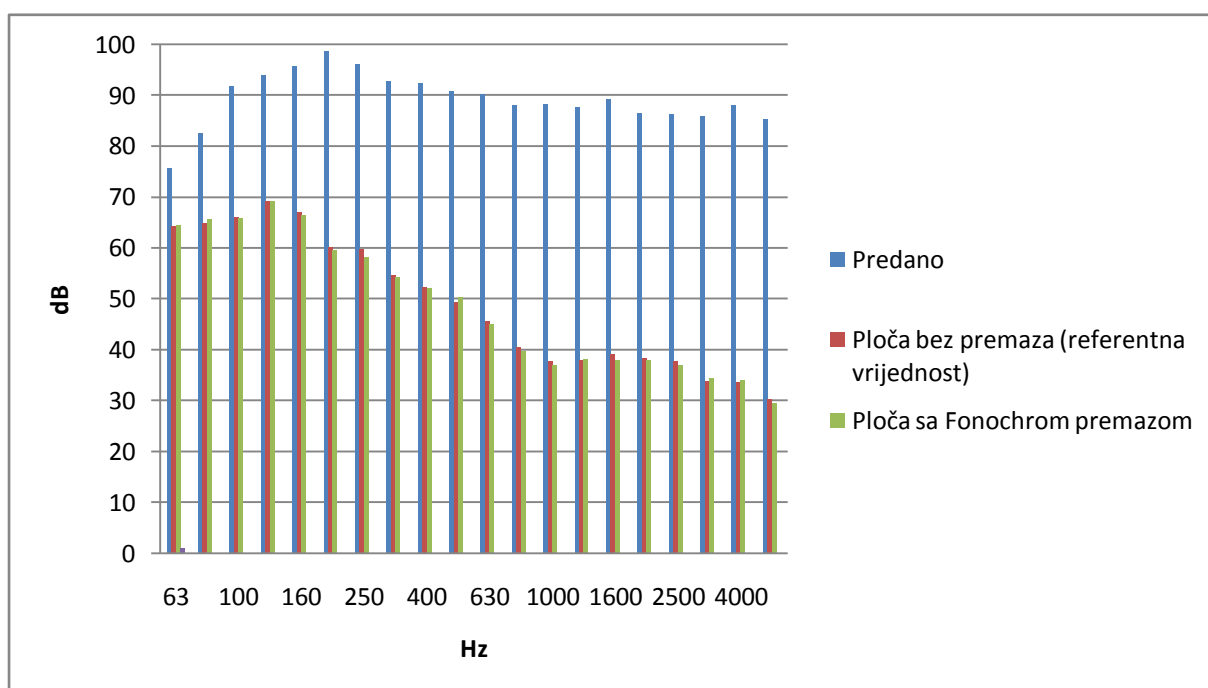
Predano [dB]	Izmjereno [dB]	
	<i>Ploča bez premaza (referentna vrijednost)</i>	<i>Ploča sa Fonochrom premazom</i>
90, 73	49, 33	50, 32
90, 14	45, 66	45, 15
88, 14	40, 55	39, 81
88, 19	37, 68	37, 00
87, 54	38, 11	38, 21
89, 17	39, 11	38, 09
86, 50	38, 43	37, 93
86, 17	37, 80	36, 90
85, 90	33, 76	34, 44
87, 96	33, 64	34, 08
85, 24	30, 34	29, 48



Slika 45. Rezultati ispitivanja prikazani 3D dijagramom



Slika 46. Rezultati ispitivanja prikazani 2D dijagramom



Slika 47. Rezultati ispitivanja prikazani bar chartom

Na osnovu preliminarne rezultata ispitivanja, nije utvrđena značajna razlika između izmjerenih vrijednosti razina buke uz korištenje premaza i bez njega. Razlog tome se može tražiti u debljini sloja nanijetog premaza koja je iznosom od 700 μm značajno odstupala od minimalne potrebne debljine sloja koja iznosi 2000 μm . Eksperiment, dakle, valja ponoviti, uz odgovarajuću debljinu nanijetog sloja premaza.

8. ZAKLJUČAK

Premazi za zaštitu od buke jedan su od načina rješavanja problema pogonske buke. Iako na prvi pogled tako ne djeluje, dugo izlaganje čovjeka (radnika) buci (industrijske hale) može imati izrazito loše posljedice na zdravstveno (pa i mentalno) stanje pojedinca.

Postoje brojni vidovi razrađenih metoda za zaštitu od buke, no oni, u proizvodnome okruženju, a iz različitih razloga (neisplativost poslodavcu, nekompatibilnost sa proizvodnim procesom i sl.), ne pružaju dovoljnu zaštitu.

Premazi za zaštitu od buke sigurno neće u potpunosti izolirati zvučnu podlogu postrojenja, ali mogu, s obzirom na svoju cijenu i jednostavnu aplikaciju, dati svoj obol borbi protiv zvučnog onečišćenja.

Ono što takve premaze čini učinkovitima jest svojstvo viskoelastičnosti- osobina pojedinog materijala da, u danoj prilici, u isto vrijeme pokazuje i elastična i viskozna svojstva. Tim se mehanizmom zvučni val lomi te se dio njegove energije pretvara u toplinu.

Viskoelastična svojstva premaza još više može istaknuti primjena nanočestica kao njihovog gradivnog materijala. Uz to, nanočestice, same po sebi, dolaze sa nizom zgodnih osobina koje čine kvalitetniji materijal.

Preliminarno ispitivanje stupnja prigušenja buke Fonochrom premaza za zaštitu od buke, provedeno pomoću dvaju ploča (referentna bez premaza te ispitna sa premazom), uz kontrolirane uvjete izvora buke i korištenjem gluhe komore, pokazalo je kako korištenje premaza ne donosi značajno smanjenje razine buke. Ipak, kako je ispitivanje vršeno uz debljinu premaza izrazito manju od preporučene, te kako konzultirana literatura sugerira pozitivnu korelaciju između korištenja zvučno- prigušujućih premaza i samog prigušenja buke, eksperiment treba ponoviti.

9. LITERATURA

- [1] Lesić, I.: „Vizualizacija akustičnih pojava“, Prirodoslovno- matematički fakultet, Fizički odsjek, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [2] Đerek, V.: „Analiza zvuka“, sa interneta, <http://vex.gkvk.hr/stty/analiza%20zvuka%20v2.pdf>, pristupljeno 15. 1. 2013.
- [3] Mijić, M.: „Elektroakustika i audiotehnika“, Nauka, Beograd, 2001.
- [4] Sa interneta, http://accessiblemediacenter.techadapt.com/samples/CAST_Exemplars/Exemplar6/content/bodymatter-level2-82.htm, pristupljeno 16. 1. 2013.
- [5] Sajko, R.: „Postupci ostvarivanja globalnog osvjetljenja“, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2008.
- [6] ORBUS Belgium: „Uvod u teoriju relativiteta“, sa interneta, http://www.orbus.be/fizika/teorija_relativiteta.htm, pristupljeno 16. 1. 2013.
- [7] Kirin, S., Lauš, K.: „Istraživanje razine buke u tehnološkom procesu šivanja“, *Sigurnost*, vol. 53, br. 3, 243- 250, 2011.
- [8] Filić, M., Germ, M., Ivšić, B., Suhanek, M.: „Zagađenje okoliša bukom“, sa interneta, http://www.fer.unizg.hr/download/repository/ORIZO_Prezentacija4_050111.ppt, pristupljeno 26. 1. 2013.
- [9] Sa interneta, http://www.fer.unizg.hr/download/repository/108_Buka_i_vibracije.pdf, pristupljeno 26. 1. 2013.
- [10] Pivac, G.: „Buka na radnom mjestu“, sa interneta, http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/pivac/buka_zvuk_ton_page.htm, pristupljeno 27. 1. 2013.
- [11] Sa interneta, <http://hr.wikipedia.org/wiki/Simpatikus>, pristupljeno 1. 2. 2013.
- [12] Jambrošić, K.: „Utjecaj buke na čovjeka“, Zvuk i okoliš- podloge za predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [13] „Zakon o zaštiti od buke“, Narodne novine, 30/ 2009
- [14] Abas Ali, S.: „Industrial noise levels and annoyance in Egypt“, *Applied Acoustics*, br. 72, 221- 225, 2011.

- [15] Pierrette, M., Marquis- Favre, C., Morel, J., Rioux, L., Vallet, M., Viollon, S., Moch, A.: „Noise annoyance from industrial and road traffic combined noises: A survey and a total annoyance model comparison“, *Journal of Environmental Psychology*, br. 32, 178- 186, 2012.
- [16] „Zakon o zaštiti na radu“, Narodne novine, 59/ 1996
- [17] „Pravilnik o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu“, Narodne novine, 46/ 2008
- [18] Cheremisinoff, N. P.: „Noise control in industry: a practical guide“, Noyes Publications, Westwood, New Jersey, S. A. D., 1996.
- [19] Zaimović- Uzunović, N.: „Mjerna tehnika“, Katedra za automatizaciju i metrologiju, Mašinski fakultet, Univerzitet u Zenici, Zenica, Bosna i Hercegovina, 2006.
- [20] „ISO Standards catalogue“, sa interneta, http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/, pristupljeno 5. 3. 2013.
- [21] Levanić, T.: „Zaštita konstrukcija od korozije primjenom premaza“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [22] Alar, V., Stojanović, I., Mihalic, I.: „Zaštita ugljičnog čelika vodorazrjedivim premazima“, *Zaštita materijala*, vol. 52, br. 3, 201- 206, 2011.
- [23] Bjegović, D.: „Zaštita metala od korozije“, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [24] Stojanović, I.: „Utjecaj tehnoloških parametara na zaštitna svojstva vodorazrjedivih premaza“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [25] Kliškić, M., Vrsalović, L.: „Vježbe iz tehnologije površinske zaštite“, Kemijsko-tehnološki fakultet u Splitu, Sveučilište u Splitu, Split, 2005.
- [26] Runje, B., Kranjec, T., Alar, V., Medić, S.: „Validacija, iskazivanje i usporedba rezultata mjerenja debljine premaza“, 12. *Hrvatska konferencija o kvaliteti i 3. Znanstveni skup hrvatskog društva za kvalitetu*, Brijuni, 2012.
- [27] Vuković, J.: „Usporedba metoda mjerenja debljina prevlaka“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [28] Levanić, T.: „Zaštita konstrukcija od korozije primjenom premaza“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.

- [29] Zhang, C. H., Hu, Z., Gao, G., Zhao, S., Huang, Y. D.: „Damping behavior and acoustic performance of polyurethane/ lead zirconate titanate ceramic composites“, *Materials and Design*, br. 46, 503- 510, 2013.
- [30] Aldraihem, O. J., Akl, W. N., Baz, A. M.: „Nanocomposite functional paint sensor for vibration and noise monitoring“, *Sensors and Actuators A: Physical*, br. 149, 233- 240, 2009.
- [31] Rao, M. D.: „Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes“, *Journal of Sound and Vibration*, br. 262, 457- 474, 2003.
- [32] Kari, L., Lindgren, K., Feng, L., Nilsson, A.: „Constrained polymer layers to reduce noise: reality or fiction? An experimental inquiry into their effectiveness“, *Polymer Testing*, br. 21, 949- 958, 2002.
- [33] Fan, R., Meng, G., Yang, J., He, C.: „Experimental study of the effect of viscoelastic damping materials on noise and vibration reduction within railway vehicles“, *Journal of Sound and Vibration*, br. 319, 58- 76, 2009.
- [34] Wang, H., Gong, Y., Lu, W., Chen, B.: „Influence of nano- SiO₂ on dilatational viscoelasticity of liquid/ air interface of cetyltrimethyl ammonium bromide“, *Applied Surface Science*, br. 254, 3380- 3384, 2008.
- [35] „Viskoelastičnost“, podloge za predavanja, Biotehniška fakultet, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija, 2012.
- [36] Yu, L., Ma, Y., Zhou, C., Xu, H.: „Damping efficiency of the coating structure“, *International Journal of Solids and Structures*, br. 42, 3045- 3058, 2005.
- [37] Govorčin Bajsić, E.: „Dinamička mehanička analiza“, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [38] Khanna, A. S.: „Nanotechnology in High Performance Paint Coatings“, *Asian Journal of Experimental Sciences*, vol. 21, br. 2, 25- 32, 2008.
- [39] Linsinger, T. P. J., Roebben, G., Solans, C., Ramsch, R.: „Reference materials for measuring the size of nanoparticles“, *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 30, br. 1, 18- 27, 2011.
- [40] Pacheco- Torgal, F., Jalali, S.: „Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials“, *Construction and Building Materials*, br. 25, 582- 590, 2011.

- [41] de Dios, A. S., Díaz- García, M. E.: „Multifunctional nanoparticles: Analytical prospects“, *Analytica Chimica Acta*, br. 666, 1- 22, 2010.
- [42] Kaliyaperumal, S., Barghi, S., Zhu, J., Briens, L., Rohani, S.: „Effects of acoustic vibration on nano and sub- micron powders fluidization“, *Powder Technology*, br. 210, 143- 149, 2011.
- [43] Zhang, H., Zhang, H., Tang, L., Zhou, L., Eger, C., Zhang, Z.: „Comparative study of the optical, surface mechanical and wear resistant properties of transparent coatings filled with pyrogenic and colloidal silica nanoparticles“, *Composites Science and Technology*, br. 71, 471- 479, 2011.
- [44] Arce González, V. C.: „Effects of Carbon nanotubes Addition on Vibration Damping Behavior of Epoxy Resins“, sa interneta, <http://www.earthzine.org/2012/10/24/effects-of-carbon-nanotubes-addition-on-vibration-damping-behavior-of-epoxy-resins/>, pristupljeno 14. 6. 2013.
- [45] Suhr, J., Koratkar, N., Keblinski, P., Ajayan, P.: „Viscoelasticity in carbon nanotube composites“, *Nature Materials*, vol. 4, 134- 137, 2005.
- [46] Chromos boje i lakovi d. d.: Katalog
- [47] „Industrijska akustika“, predložak za laboratorijske vježbe, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, 2009.